Amazon Data Services Italy S.r.l.

Progetto di Data Center Edificio A (Zibido San Giacomo)

ADS Italy srl – Progetto di Data Center Edificio A (Zibido San Giacomo)

Modellazione Idrogeologica - Integrazioni contributi MASE

Reference: NA

0 | 25 giugno 2026

Firmato digitalmente da: GIOVANNI CROSTA
Limitazioni d'uso: Explicit Text: Certificate issued through Sistema Pubblico di Identità Digitale (SPID) digital identity, not usable to require other SPID digital identity
Data: 25/06/2026 16:54:41

Questa relazione è stata redatta per tener conto delle particolari prescrizioni ed esigenze del Cliente. Non è intesa per essere divulgata a terze parti, per altri scopi. In tal caso, non viene assunta alcuna responsabilità per l'uso che ne venga fatto da parte di terzi.

©

Job number 306525-00

Arup Italia S.r.l.
Corso Italia 1
Milan
20122
Italy
arup.com

Signed with NamirialSign

MATTEO BRUNO
01/07/2026 12:41:05 UTC+0200

Verifica Documento

Progetto	Progetto di Data Center Edificio A (Zibido San Giacomo)
Titolo Documento	ADS Italy srl – Progetto di Data Center Edificio A (Zibido San Giacomo) Modellazione Idrogeologica - Integrazioni contributi MASE
Job number	306525-00
Documento rif	NA
File rif	NA

Rev.	**Revision**	**Data**				
			Nome del file	Modellazione Idrogeologica - Integrazioni contributi MASE		
25GIU26	0		**Descrizione**			
				Redatto da	**Verificato da**	**Approvato da**
			Nome	AP (EG4Risk) MF (EG4Risk)	PF (EG4Risk) GM (Arup)	GBC (EG4Risk) SL (Arup)
			Firma			
			Nome del file			
			Descrizione			
				Redatto da	**Verificato da**	**Approvato da**
			Nome			
			Firma			
			Nome del file			
			Descrizione			
				Redatto da	**Verificato da**	**Approvato da**
			Nome			
			Firma			

Emissione Verifica Documento in allegato al Documento ☑

Indice

1. Premessa 1

2. Scopo del lavoro 2

3. Ubicazione del sito 3

4. Ambiente idrico, acque superficiali e sotterranee 5

4.1 Caratterizzazione idrogeologica del sito: 5

4.1.1 Assetto idrogeologico e stratigrafico 5

4.1.2 Delimitazione delle aree di salvaguardia delle derivazioni asservite alla rete acquedottistica 8

4.1.3 Assetto piezometrico 9

4.1.4 Parametrizzazione dell'acquifero 10

4.1.5 Dati quantitativi sui prelievi 13

5. Modellazione idrogeologica finalizzata alla valutazione degli effetti dei prelievi sulla falda 14

5.1.1 Valori piezometrici di riferimento 14

5.1.2 Codice di calcolo 15

5.1.3 Caratteristiche della mesh 16

5.1.4 Condizioni al contorno e iniziali 17

5.1.5 Parametri idraulici 18

5.1.6 Calibrazione del modello 19

5.1.7 Strategia di modellazione 19

6. Risultati della modellazione idrogeologica 22

6.1.1 Scenario S1a (elevata conducibilità idraulica) 24

6.1.2 Scenario S1b (bassa conducibilità idraulica) 26

6.1.3 Scenario S2 (sostenibilità dei prelievi a lungo termine) 28

7. Considerazioni finali 30

Tabelle

Tabella 4-1. Informazioni disponibili all'interno dell'area di studio. 11

Tabella 4-2. Posizione dei pozzi in progetto per il funzionamento del sistema di raffreddamento e umidificazione del Data Centre. 13

Tabella 4-3. Consumi idrici previsti per il funzionamento del sistema di raffreddamento e umidificazione del Data Centre. 13

Tabella 5-1. Coordinate e quote dei piezometri, con valore di soggiacenza misurato il giorno 11/06/2026. 15

Tabella 5-2. Sommario delle caratteristiche fondamentali del modello 3D (tipo di problema, proiezione, caratteristiche e qualità della mesh) 16

Tabella 5-3. Caratteristiche dei pozzi presenti all'interno del dominio di interesse. 18

Tabella 5-4. Residui ottenuti a seguito della fase di calibrazione del modello per gli scenari Kmin e Kmax. 19
Tabella 5-5. Caratteristiche degli scenari di modellazione 20
Tabella 6-1. Valori massimi di abbassamento in pozzo e a 100 m distanza per i diversi scenari simulati. 22
Tabella 6-2. Abbassamenti simulati in corrispondenza dei pozzi esistenti per gli scenari considerati 22

Figure

Figura 3-1. Localizzazione del sito in relazione a Milano – nord Italia 3
Figura 3-2. Inquadramento area scala comunale – Zibido San Giacomo 4
Figura 3-3. Inquadramento dell'area rispetto al contesto locale nel comune di Zibido San Giacomo 4
Figura 4-1. Carta idrogeologica che mostra le isolinee piezometriche relative all'anno 2022, la soggiacenza ottenuta per differenza tra la topografia da DTM Regione Lombardia e la piezometria nel 2022, la posizione dei fontanili e dei pozzi idropotabili con rispettive fasce di rispetto a 200m. Scala 1:80000 5
Figura 4-2. Sezioni idrostratigrafiche (in alto a larga scala, in basso di dettaglio): le linee verticali mostrano i sondaggi della Banca Dati Geologica del Sottosuolo (BDGS) di Regione Lombardia classificati in funzione della permeabilità dei depositi. La base dell'Idrostruttura Sotterranea Superficiale (ISS) e intermedia (ISI) sono mostrate da linee nere tratteggiate e continue, mentre la superficie piezometrica è mostrata in blu. L'area in rosa mostrata nella sezione di dettaglio indica l'ipotetica collocazione degli orizzonti a bassa permeabilità (acquitardi) all'interno della ISS che verranno confermate nella stratigrafia di riferimento presentata in seguito. La posizione dei pozzi in progetto è mostrata da una linea tratteggiata verticale, il cui tratto continuo mostra l'estensione del tratto filtrante previsto. 7
Figura 4-3. Estratto tav. G1T6 - Carta dei vincoli geologici e ambientali del PGT del comune di Zibido San Giacomo. Il sito è individuato dal colore rosso. 8
Figura 4-4. Oscillazioni piezometriche a monte e valle dell'area di interesse espresse in soggiacenza (m da p.c.). 9
Figura 4-5. Ubicazione delle indagini effettuate e posizione dei pozzi oggetto di questo studio 10
Figura 4-6. Rappresentazione schematica delle stratigrafie dei sondaggi considerati in questo studio e risultati delle prove idrogeologiche (K = conducibilità idraulica in m/s) e geotecniche utili alla parametrizzazione idrogeologica del sottosuolo. La rappresentazione è da intendersi come una visione d'insieme delle caratteristiche dell'area e non rappresenta una sezione geologica. 11
Figura 4-7. Schema costruttivo del pozzo e profondità delle opere di completamento. 12
Figura 5-1. Delimitazione del dominio di modellazione e rapporti con l'assetto piezometrico locale. 14
Figura 5-2. Andamento medio annuale della soggiacenza misurato dai piezometri della rete SIF nell'intorno dell'area di studio per un intervallo temporale di 18 anni. 15
Figura 5-3. Vista tridimensionale del dominio di modellazione che illustra le condizioni al contorno applicate (esagerazione verticale x4). I pozzi già presenti nel dominio di modellazione sono indicati in rosso, mentre i pozzi in progetto sono indicati in giallo. 17
Figura 5-4. – Distribuzione delle conducibilità orizzontali all'interno del modello, lungo una sezione orientata NW – SE (esagerazione verticale x4). I rettangoli in giallo evidenziano gli intervalli di profondità in cui verranno realizzati i tratti filtrati dei pozzi in progetto. 19
Figura 5-5. Serie temporale dei prelievi in corrispondenza di ciascun pozzo in progetto nello scenario più cautelativo (90 giorni), utilizzata per stimare gli abbassamenti durante le condizioni di picco. 21
Figura 6-1. Posizione dei punti di monitoraggio inseriti nel dominio di modellazione. 23
Figura 6-2. Abbassamento della superficie piezometrica simulato in corrispondenza del punto medio del tratto filtrante dei pozzi in progetto al tempo T = 89.2 giorni (termine dell'ultima fase di

accensione dell'impianto) e al tempo T = 90 giorni (spegnimento dell'impianto) in condizioni di alta conducibilità idraulica degli acquiferi. 24

Figura 6-3. Andamento del carico idraulico nel tempo (scenario Kmax) per un intervallo di simulazione della durata di 365 giorni di cui i primo 90 con funzionamento in condizioni di picco (10.5 l/s per pozzo per 5h/giorno): (a) abbassamento in pozzo P1 e P2, (b) visione di dettaglio sui primi 20 giorni; (c) in corrispondenza di due punti di osservazione posti a una distanza di 100 m a monte e verso est rispetto ai pozzi; (d) in corrispondenza dei pozzi esistenti compresi entro il dominio di modellazione. 25

Figura 6-4. Abbassamento della superficie piezometrica simulato in corrispondenza del punto medio del tratto filtrante dei pozzi in progetto al tempo T = 89.2 giorni (termine dell'ultima fase di accensione dell'impianto) e al tempo T = 90 giorni (spegnimento dell'impianto) in condizioni di bassa conducibilità idraulica degli acquiferi. 26

Figura 6-5. Andamento del carico idraulico nel tempo in condizioni di Kmin in corrispondenza del tratto filtrato dei pozzi in progetto per un intervallo di simulazione della durata di 365 giorni (a) e con una visione di dettaglio sui primi 20 giorni (b); andamento del carico idraulico nel tempo in corrispondenza di due punti di osservazione posti a una distanza di 100 m a monte e verso est rispetto all'impianto di progetto (c); andamento del carico idraulico nel tempo in corrispondenza dei pozzi già presenti entro il dominio di modellazione (d). 27

Figura 6-6. Bilancio idrogeologico del modello per la valutazione dell'influenza dei nuovi pozzi nel medio – lungo termine. I valori negativi si riferiscono a uscite dal modello e quelli positive alle entrate. Le condizioni al contorno di Dirichlet sono quelle a monte e valle del modello. La condizione di Neumann è riferita alla ricarica e la condizioni Wells è riferita ai pozzi (il valore positivo è dovuto al pozzo di resa dell'impianto geotermico presente nell'area del modello). 28

1. Premessa

Il presente documento è redatto su richiesta del Cliente Amazon Data Services (ADS) nell'ambito del procedimento identificato con *ID: 14476, relativo alla Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ai sensi dell'art. 23 del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii., concernente il progetto "Regione AWS Europe (Milan) – Espansione – Datacenter Edificio A nel Comune di Zibido San Giacomo (MI)"*.

Il documento costituisce riscontro alla richiesta di documentazione integrativa formulata dal MASE.

Nell'ambito del procedimento richiamato, il documento fornisce il supporto tecnico-specialistico alla valutazione degli effetti idrogeologici connessi al prelievo di acque sotterranee, con particolare riferimento alla verifica di compatibilità dell'intervento rispetto al regime piezometrico locale e ai recettori idrogeologici presenti nell'intorno significativo del sito.

A tal fine, l'elaborato descrive l'impostazione metodologica, lo sviluppo e gli esiti del modello idrogeologico numerico predisposto per la simulazione degli abbassamenti piezometrici indotti dall'emungimento. I risultati modellistici costituiscono la base tecnico-scientifica per la valutazione della trascurabilità degli impatti sul sistema acquifero, sia in termini di interferenza con la produttività della falda sia rispetto alla variabilità delle condizioni piezometriche stagionali.

Si evidenzia inoltre che, in data 05.02.2026, il Proponente ha attivato il procedimento di Concessione di Piccola Derivazione di Acqua Pubblica Sotterranea, trasmettendo alla Città Metropolitana di Milano la relativa istanza, riferita a n. 2 pozzi per una portata massima complessiva pari a 21 l/s.

2. Scopo del lavoro

Scopo del lavoro è valutare, mediante modellazione numerica del flusso di falda, gli effetti del prelievo di acque sotterranee ad uso industriale, previsto a servizio del Data Center, da attuarsi mediante n. 2 pozzi di progetto. L'analisi è finalizzata a stimare gli abbassamenti piezometrici indotti nel cosiddetto "acquifero A", per effetto dell'emungimento previsto nei pozzi di progetto.

3. Ubicazione del sito

Il sito di studio si localizza nel comune di Zibido San Giacomo, a sud della città di Milano, in un comparto prevalentemente industriale e produttivo. Il contesto più ampio dove si colloca il sito è caratterizzato da un paesaggio prevalentemente agricolo, caratterizzato dalla presenza estesa del Parco Agricolo Sud di Milano.

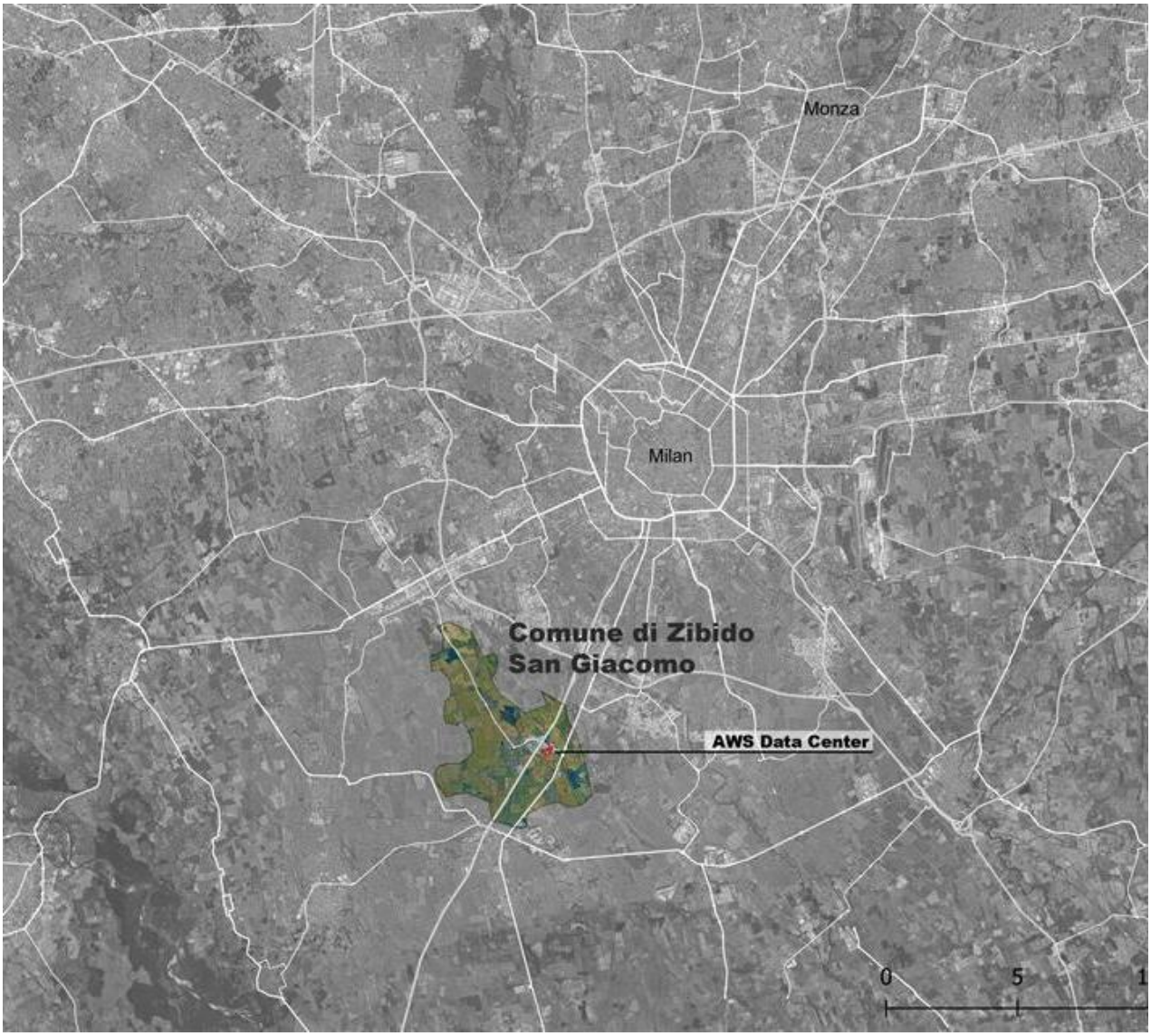

Figura 3-1. Localizzazione del sito in relazione a Milano – nord Italia

Figura 3-2. Inquadramento area scala comunale – Zibido San Giacomo

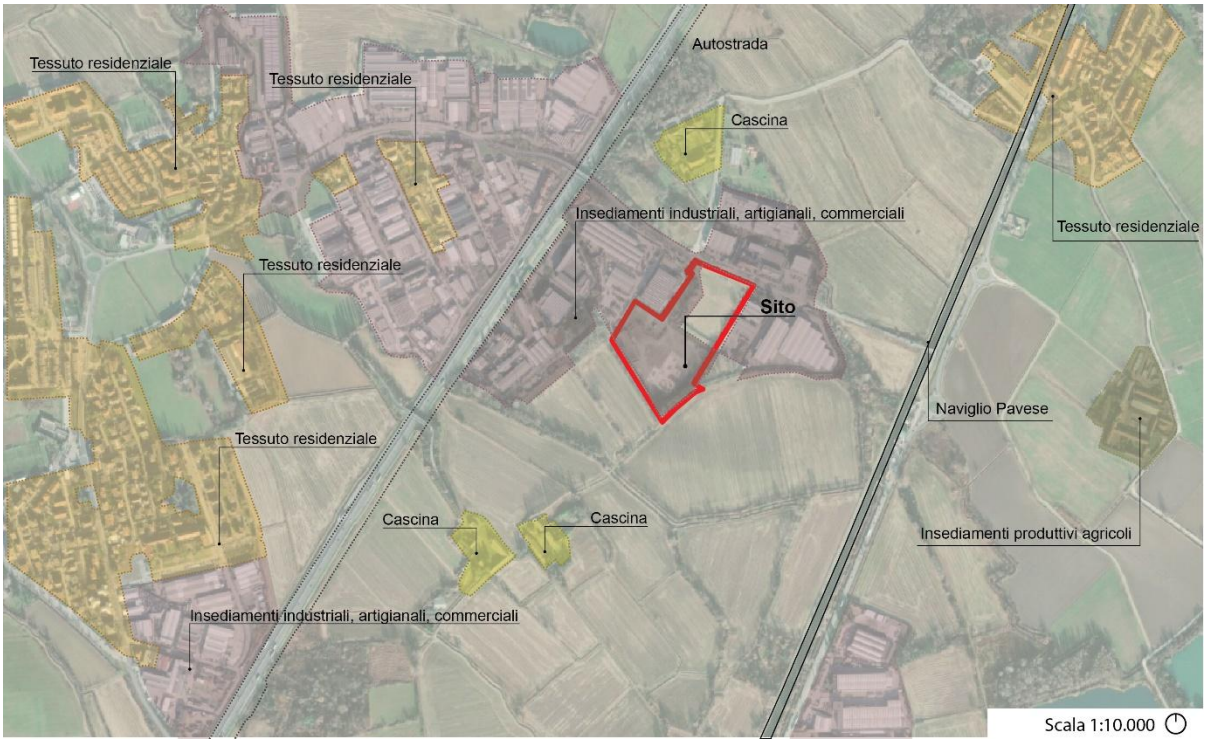

Figura 3-3. Inquadramento dell'area rispetto al contesto locale nel comune di Zibido San Giacomo

4. Ambiente idrico, acque superficiali e sotterranee

4.1 Caratterizzazione idrogeologica del sito:

4.1.1 Assetto idrogeologico e stratigrafico

L'intervento ricade nell'area di transizione tra media e bassa pianura alluvionale del fiume Po, costituita da depositi alluvionali attribuibili alle facies fluvioglaciale e fluviale würmiane.

I depositi sono caratterizzati da alternanza di:

- sabbie e ghiaie;
- orizzonti con maggiore percentuale di limo sabbioso.

L'area ricade nella cosiddetta fascia dei fontanili, caratterizzata da naturale emergenza della falda per diminuzione del gradiente topografico e della permeabilità dei depositi.

La Figura 4-1 mostra gli elementi idrogeologici essenziali che caratterizzano l'area di studio:

- Morfologia blanda con gradiente topografico NNW-SSE di circa il 2‰;
- Gradiente piezometrico di circa 1.5‰ in direzione NW-SE (da piezometria del 2022);
- Soggiacenza piuttosto bassa con vaste aree nell'intervallo 0-3 m da p.c.;
- Presenza di numerose risorgive di pianura (fontanili);
- Presenza diffusa del reticolo idrico superficiale.

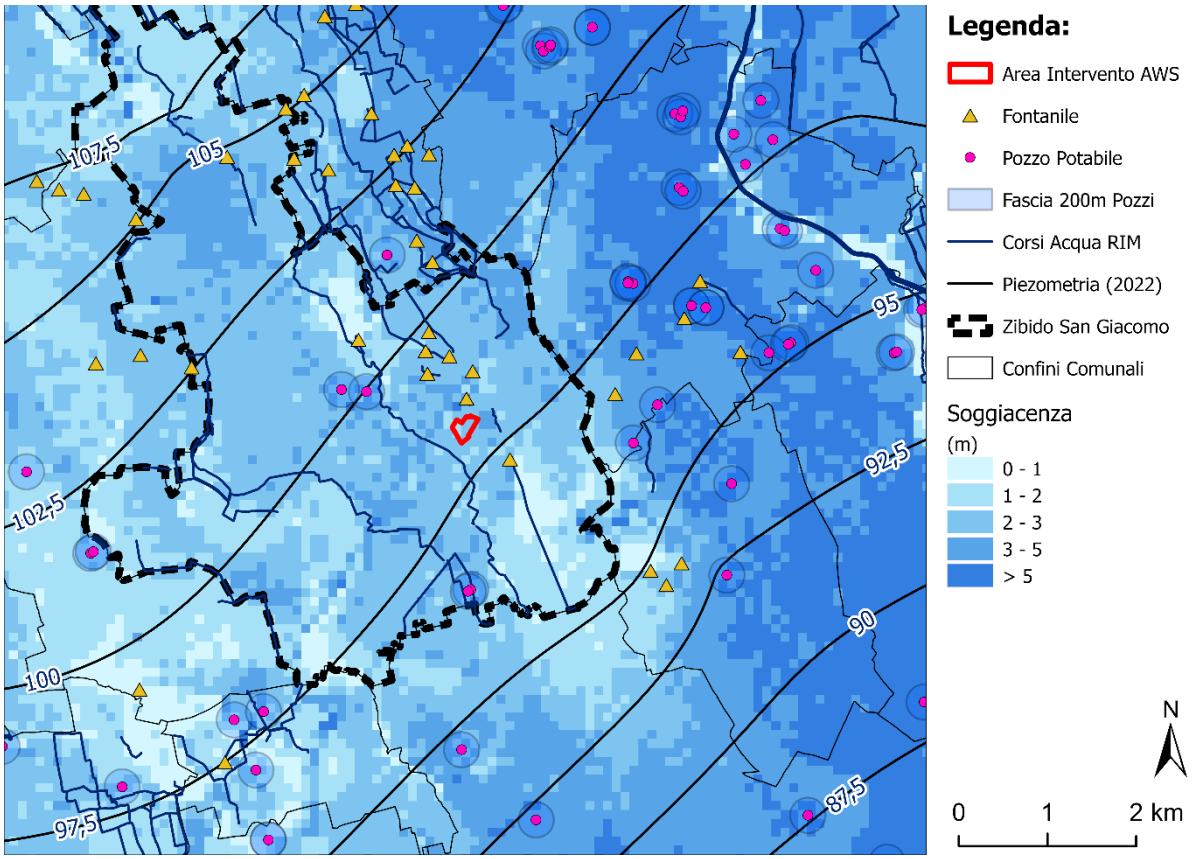

Figura 4-1. Carta idrogeologica che mostra le isolinee piezometriche relative all'anno 2022, la soggiacenza ottenuta per differenza tra la topografia da DTM Regione Lombardia e la piezometria nel 2022, la posizione dei fontanili e dei pozzi idropotabili con rispettive fasce di rispetto a 200m. Scala 1:80000

Le unità idrogeologiche del sottosuolo di riferimento sono state derivate dalla revisione alla classificazione idrostratigrafica (Gruppi acquiferi A, B, C e D) del lavoro Regione Lombardia e ENI (2002) proposta nel Piano di Tutela e Uso delle Acque (PTUA) del 2016. Quest'ultima classificazione segue un criterio idrogeologico piuttosto che puramente stratigrafico al fine di identificare la connessione verticale tra i diversi corpi acquiferi e le relazioni con la superficie. La classificazione adottata comprende tre principali unità:

- **ISS** (Idrostruttura Sotterranea Superficiale), sede dell'acquifero libero comprendente il Gruppo Acquifero A e B, nei settori di alta pianura Lombarda, e la porzione superiore del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A1) nella media e bassa pianura.
- **ISI** (Idrostruttura Sotterranea Intermedia), sede di acquiferi da semiconfinati a confinati, comprendente la porzione profonda del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A2) e il Gruppo Acquifero B presente nella media e bassa pianura.
- **ISP** (Idrostruttura sotterranea profonda), sede di acquiferi confinati comprendente il Gruppo Acquifero C nei settori di alta e media pianura in cui esso è conosciuto tramite indagini dirette e captato.

Vista la naturale eterogeneità verticale dei depositi superficiali si propone la seguente sezione idrogeologica interpretativa al fine di individuare il limite basale dell'unità prevista per lo sfruttamento idrico ed eventuali orizzonti a bassa permeabilità (acquitardi) più o meno riconoscibili nell'area.

La Figura 4-2 mostra la ricostruzione idrogeologica del sottosuolo effettuata per questo studio sulla base delle informazioni stratigrafiche contenute nella banca dati BDGS di Regione Lombardia, dopo opportuna classificazione in base alla permeabilità sulla base della descrizione litologica.

Nella sezione di dettaglio (in basso) si osserva lo spessore della ISS di circa 48 m (tra quota 100.7 e 52.5 m s.l.m.) di cui 45 m circa saturi (considerando la piezometria del 2022) composta da alternanze di depositi ad elevata e media permeabilità. La sottostante ISI si estende per ulteriori 90 m di profondità (tra la quota 52.7 e -38.1 m s.l.m.) mostrando in media una maggior percentuale di depositi a medio-bassa permeabilità. All'interno della ISS, osservano due strati significativi a bassa permeabilità: 1) tra 20.5 e 22.0 m di profondità con buona continuità laterale (acquitardo), 2) tra 31.5 e 34.2 m di profondità osservato localmente.

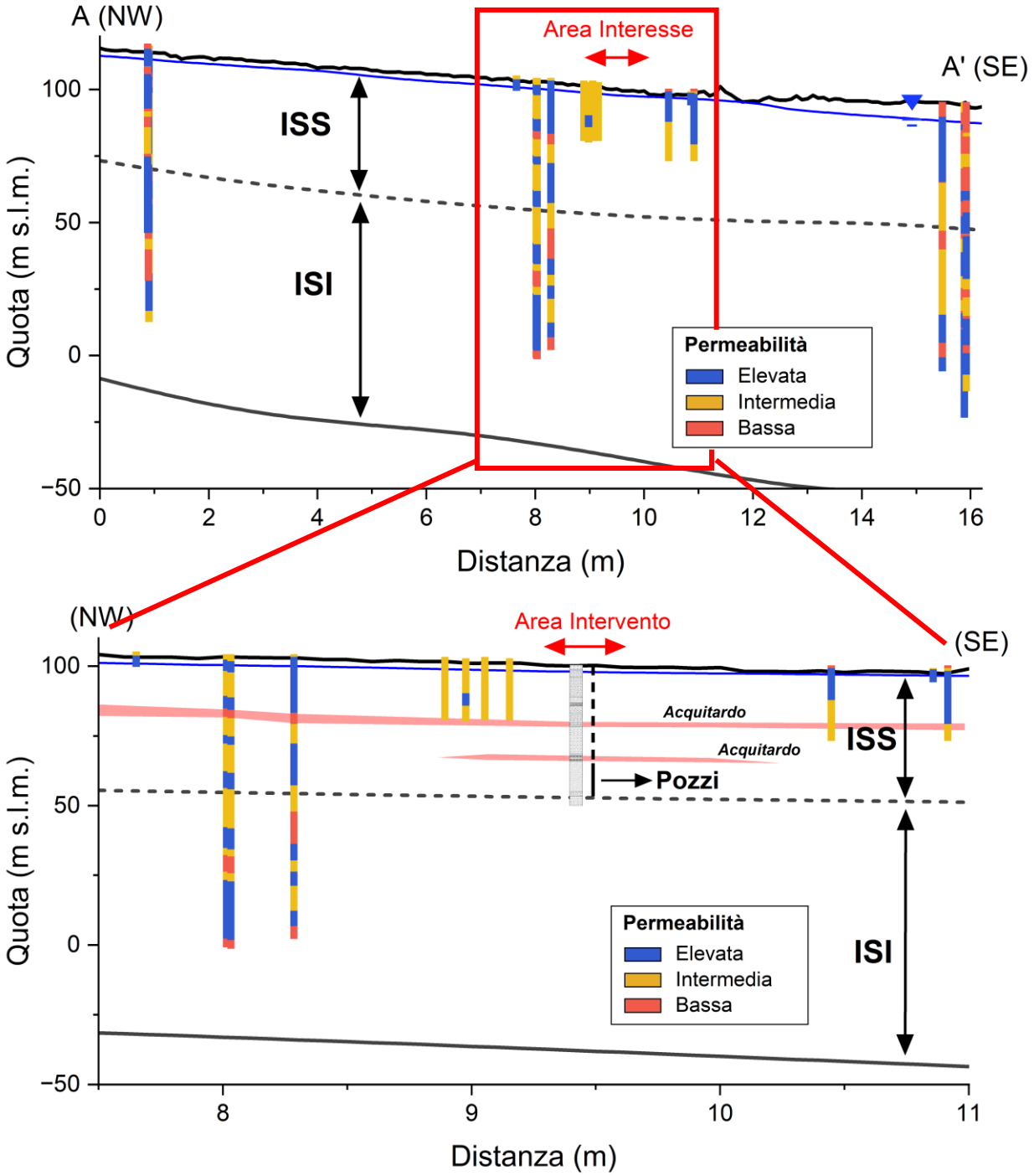

Figura 4-2. Sezioni idrostratigrafiche (in alto a larga scala, in basso di dettaglio): le linee verticali mostrano i sondaggi della Banca Dati Geologica del Sottosuolo (BDGS) di Regione Lombardia classificati in funzione della permeabilità dei depositi. La base dell'Idrostruttura Sotterranea Superficiale (ISS) e intermedia (ISI) sono mostrate da linee nere tratteggiate e continue, mentre la superficie piezometrica è mostrata in blu. L'area in rosa mostrata nella sezione di dettaglio indica l'ipotetica collocazione degli orizzonti a bassa permeabilità (acquitardi) all'interno della ISS che verranno confermate nella stratigrafia di riferimento presentata in seguito. La posizione dei pozzi in progetto è mostrata da una linea tratteggiata verticale, il cui tratto continuo mostra l'estensione del tratto filtrante previsto.

4.1.2 Delimitazione delle aree di salvaguardia delle derivazioni asservite alla rete acquedottistica

L'analisi della cartografia dei PGT del comune di Zibido San Giacomo (Variante generale al Piano di Governo del Territorio (PGT), unitamente alla Valutazione Ambientale Strategica (VAS) e VINCA, ai sensi dell'art. 13 della LR 12/2005 e ss.mm.ii. in vigore dal 18/07/2022) evidenzia l'assenza di qualsiasi interferenza con eventuali fasce di rispetto dei pozzi ad uso idropotabile nell'area del sito in esame.

Il pozzo più prossimo ad uso idropotabile (152470001) è ubicato a circa 1.2 km a nordovest dei pozzi previsti a servizio del sito ADS (Figura 4-3), con la relativa fascia di rispetto ampiamente al di fuori del confine del sito AWS stesso. La profondità di tale pozzo, pari a 100 m da p.c. con tratte filtranti ubicate fra 43.5 m da p.c. e 97.36 m da p.c., inoltre, consente di concludere che attinga prevalentemente dall'Acquifero B, sottostante e separato dall'acquifero A nel quale AWS propone di realizzare i propri pozzi di emungimento. Lo stesso si può dire per il secondo pozzo ad uso idropotabile più prossimo al sito AWS (152470002), caratterizzato da una profondità di 101 m da p.c. con tratte filtranti tra 63 m da p.c. e 100 m da p.c.[1]

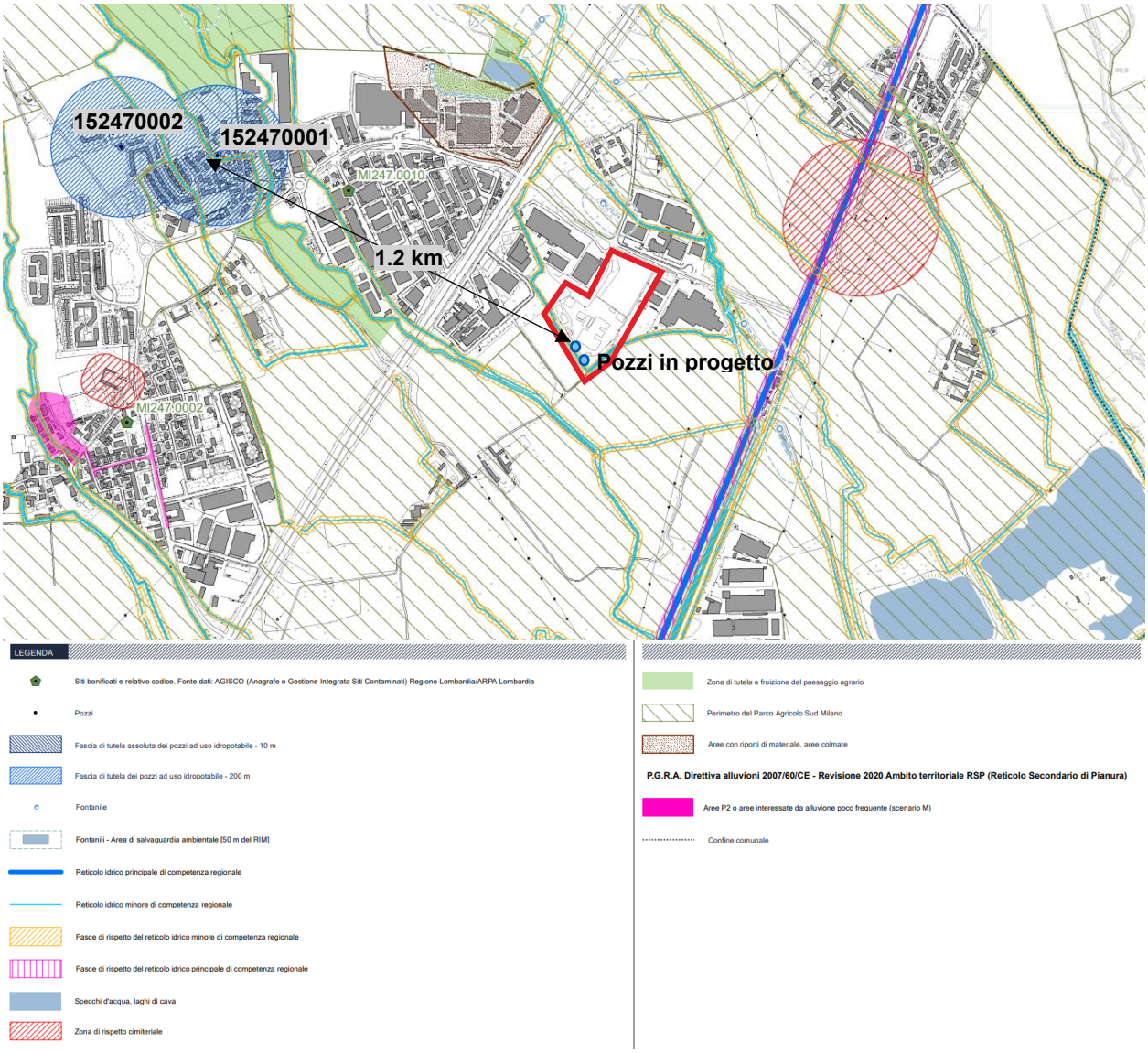

Figura 4-3. Estratto tav. G1T6 - Carta dei vincoli geologici e ambientali del PGT del comune di Zibido San Giacomo. Il sito è individuato dal colore rosso.

[1] https://www.dati.lombardia.it/Ambiente/CITTA-METROPOLITANA-MILANO-Mappa-Dati-Pozzi-Piezom/t56u-mkqh

4.1.3 Assetto piezometrico

L'analisi delle serie storiche degli ultimi 20 anni, riportate in Figura 4-4, mostra:

- soggiacenza media circa 2,5 m dal piano campagna;
- oscillazioni piezometriche ricorrenti e stabili di ±1 m.

I dati derivano da due piezometri ubicati rispettivamente:

- 5,5 km a monte idrogeologico (015247NR0185);
- 3,3 km a valle (0150150U0001).

Le serie storiche mostrano elevata stabilità del livello piezometrico, confermando buona disponibilità idrica e assenza di criticità associate a periodi siccitosi.

Figura 4-4. Oscillazioni piezometriche a monte e valle dell'area di interesse espresse in soggiacenza (m da p.c.).

4.1.4 Parametrizzazione dell'acquifero

Sulla base della campagna di indagini eseguita nel 2024, sono disponibili complessivamente quattro stratigrafie derivanti da sondaggi a carotaggio continuo: tre sondaggi (BH1, BH2, BH3) spinti fino alla profondità di 35 m dal piano campagna e un sondaggio (BH4) approfondito fino a 50 m. Nel febbraio 2025 sono stati realizzati due sondaggi (PZ1 e PZ2) a carotaggio continuo fino a 50 m. Per ciascun sondaggio sono stati prelevati campioni disturbati e indisturbati, sottoposti a prove di laboratorio geotecniche, e, in sondaggi selezionati, sono state eseguite prove in foro di tipo Lefranc.

Il sondaggio BH4 è stato attrezzato a piezometro a tubo aperto, con diametro pari a 3", fenestrato nell'intervallo di profondità compreso tra 24 e 30 m da piano campagna. Nello stesso foro è stato eseguito uno slug test, mediante introduzione di un mallet cilindrico avente volume pari a 2,45 dm^3 e diametro di 50 mm. Le prove Lefranc sono state condotte, in corso di perforazione, all'interno del foro BH4 negli intervalli di profondità 25,0–26,0 m e 35,0–36,0 m, mediante variazione (abbassamento) del carico idraulico, e successivamente interpretate secondo le raccomandazioni dell'Associazione Geotecnica Italiana (AGI).

I sondaggi PZ1 e PZ2 sono stati attrezzati a piezometri a tubo aperto, con diametro pari a 3", fenestrato nell'intervallo di profondità compreso tra 22.5 e 48 m da piano campagna.

Ai fini della caratterizzazione geotecnica e idrogeologica del sottosuolo, l'insieme dei dati è stato integrato con le informazioni derivanti da campagne pregresse, in particolare mediante i risultati della prova CPTU19, della stratigrafia del sondaggio S1 e delle relative analisi granulometriche.

La Figura 4-5 mostra l'ubicazione delle indagini descritte e la posizione dei pozzi oggetto di questo studio.

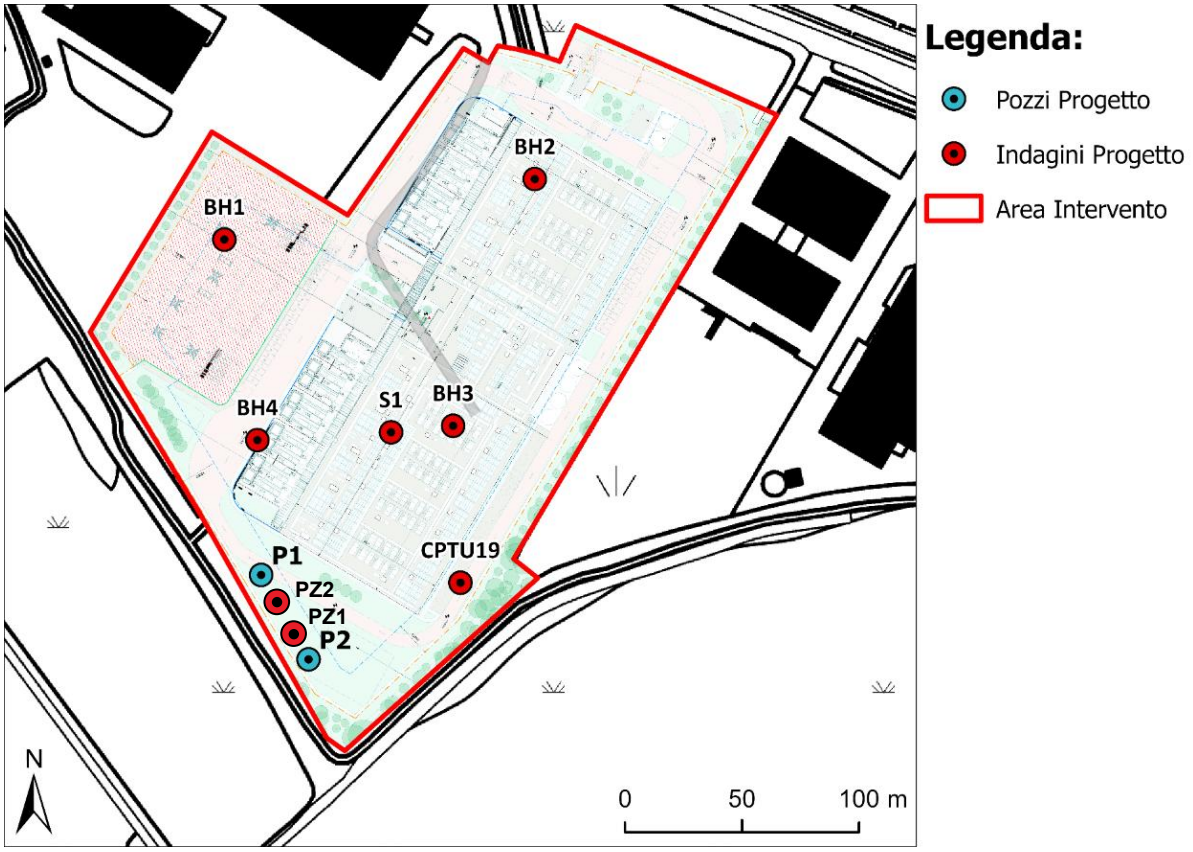

Figura 4-5. Ubicazione delle indagini effettuate e posizione dei pozzi oggetto di questo studio

Ai fini della parametrizzazione sono state considerate le seguenti stratigrafie e prove geotecniche/ idrogeologiche:

Tabella 4-1. Informazioni disponibili all'interno dell'area di studio.

Sondaggio	Profondità	Stratigrafia	Granulometria	Lefranc	Slug test
BH4	50	✓		25 | 35 m	✓
BH3	35	✓	17.5 | 21.5 | 24.5 m		
CPTU19	25	✓			
S1	35	✓	27.5 | 33.5 m		
PZ1	50	✓			
PZ2	50	✓	40 m		

La Figura 4-6 riassume le caratteristiche stratigrafiche e idrogeologiche desunte dalle 3 indagini limitrofe alla posizione proposta per i due pozzi. Queste informazioni verranno utilizzate per la definizione della stratigrafia di riferimento adottata per la progettazione dei pozzi.

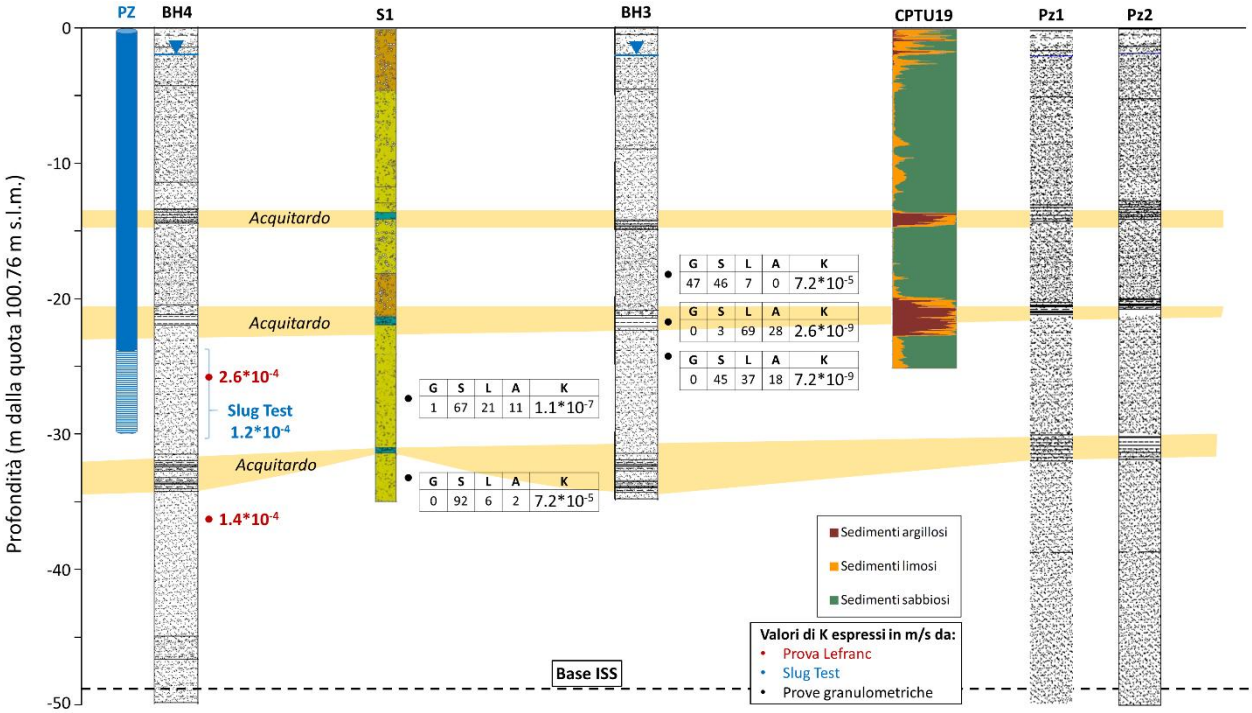

Figura 4-6. Rappresentazione schematica delle stratigrafie dei sondaggi considerati in questo studio e risultati delle prove idrogeologiche (K = conducibilità idraulica in m/s) e geotecniche utili alla parametrizzazione idrogeologica del sottosuolo. La rappresentazione è da intendersi come una visione d'insieme delle caratteristiche dell'area e non rappresenta una sezione geologica.

Sulla base della stratigrafia mostrata dalle indagini preliminari, la Figura 4-7 mostra la proposta di schema costruttivo del pozzo e la profondità delle opere di completamento.

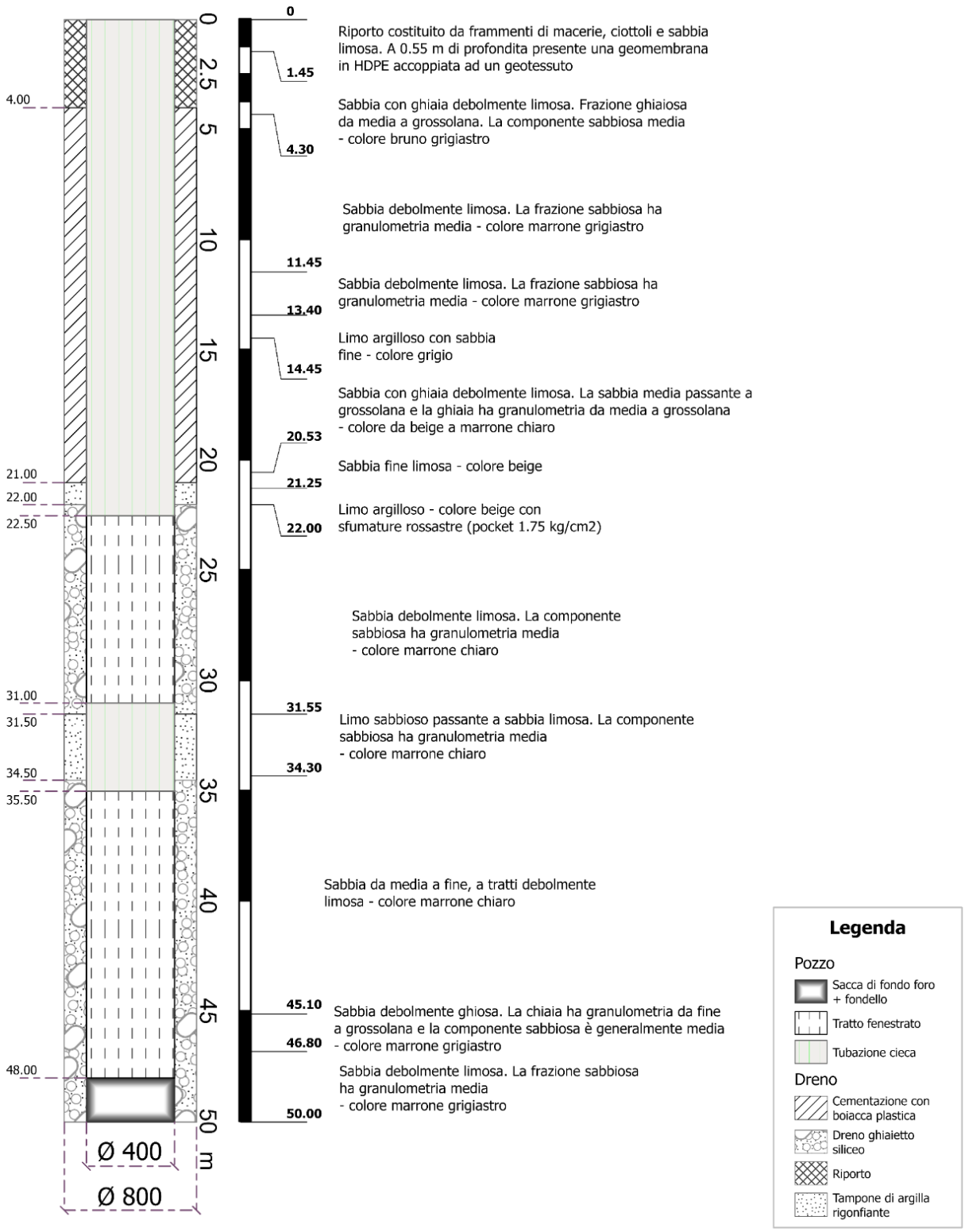

Figura 4-7. Schema costruttivo del pozzo e profondità delle opere di completamento.

4.1.5 Dati quantitativi sui prelievi

Il fabbisogno di acqua di prima falda necessario alle esigenze di raffreddamento del Data Center sarà soddisfatto mediante n. 2 pozzi di progetto, profondi 50 m e fenestrati tra 22.5 e 31 m da p.c. e tra 35.5 e 48 m da p.c., all'interno del solo Acquifero A.

Si riportano nella tabella seguente le coordinate dei pozzi industriali oggetto della modellazione.

Tabella 4-2. Posizione dei pozzi in progetto per il funzionamento del sistema di raffreddamento e umidificazione del Data Centre.

Pozzo	X (UTM)	Y (UTM)	Lat (WGS84)	Lon (WGS84)
P1	509818.3	5023331.5	45.363427	9.125369
P2	509838.5	5023295.5	45.363103	9.125626

Il profilo di consumo idrico del Data Center presenta una marcata variabilità stagionale, caratterizzata da valori massimi nel periodo estivo, in corrispondenza del picco del fabbisogno di raffreddamento, e da una progressiva riduzione fino a condizioni nulle durante la stagione invernale.

L'impiego delle acque di falda è previsto esclusivamente in condizioni di elevate temperature esterne (indicativamente superiori a 29 °C); ne consegue un esercizio non continuo del sistema, direttamente correlato alle esigenze di riempimento dei serbatoi di accumulo di acque industriali.

La stima dei fabbisogni idrici è stata sviluppata assumendo come scenario di riferimento l'anno climaticamente più gravoso tra quelli analizzati, individuato nel 2003. Tale anno rappresenta il caso peggiore nell'ambito di una serie storica di 31 anni di dati meteorologici orari (periodo 1994–2024) riferiti all'area di Milano Malpensa.

In tale configurazione, il fabbisogno idrico annuo massimo per gli usi industriali del Data Center è stato stimato pari a circa 24.000 m³/anno. L'analisi ha evidenziato come l'emungimento risulti prevalentemente concentrato nel trimestre estivo (giugno–agosto), con contributi residuali nei mesi di maggio e settembre.

La portata massima complessiva estratta dai pozzi in esercizio è quindi assunta pari a circa 21 l/s, ripartita su due pozzi, ciascuno operante con una portata di circa 10,5 l/s; nello scenario più estremo, quindi durante i mesi estivi (da giugno ad agosto), si stima un tempo di funzionamento giornaliero dei pozzi pari a circa 5 ore.

Si sottolinea che la portata massima di progetto pari a 21 l/s, assunta nelle simulazioni idrogeologiche, rappresenta una condizione cautelativa riferita esclusivamente alla fase di avviamento dell'impianto di trattamento delle acque. Infatti, una volta entrato a regime il sistema di raffreddamento e attivato il ricircolo delle acque reflue trattate all'interno del processo, il fabbisogno di acqua di reintegro si riduce e la portata complessivamente richiesta ai pozzi può essere limitata a 17,1 l/s.

I principali parametri di progetto sono sintetizzati nella tabella seguente.

Tabella 4-3. Consumi idrici previsti per il funzionamento del sistema di raffreddamento e umidificazione del Data Centre.

Parametro	Valore
Consumo totale annuo	24.000 m³/anno
Portata media annua (equivalente)	2,7 l/s
Portata massima per pozzo	10,5 l/s
Portata massima totale (due pozzi in contemporanea)	20,9 l/s (≈ 21 l/s)

5. Modellazione idrogeologica finalizzata alla valutazione degli effetti dei prelievi sulla falda

Al fine di valutare gli effetti dei prelievi sulla falda, nonché la sostenibilità dei prelievi nel medio-lungo periodo, è stata eseguita una modellazione idrogeologica tridimensionale tramite il codice di calcolo numerico Feflow.

Il dominio di interesse (Figura 5-1) è stato definito considerando una distanza pari ad almeno 500 m dai pozzi di progetto. La modellazione è stata impostata tra due equipotenziali piezometriche, successivamente utilizzate come condizioni al contorno, ricavate dall'analisi dell'andamento piezometrico regionale nel territorio della città Metropolitana di Milano (mappa piezometrica del settembre 2022[2]).

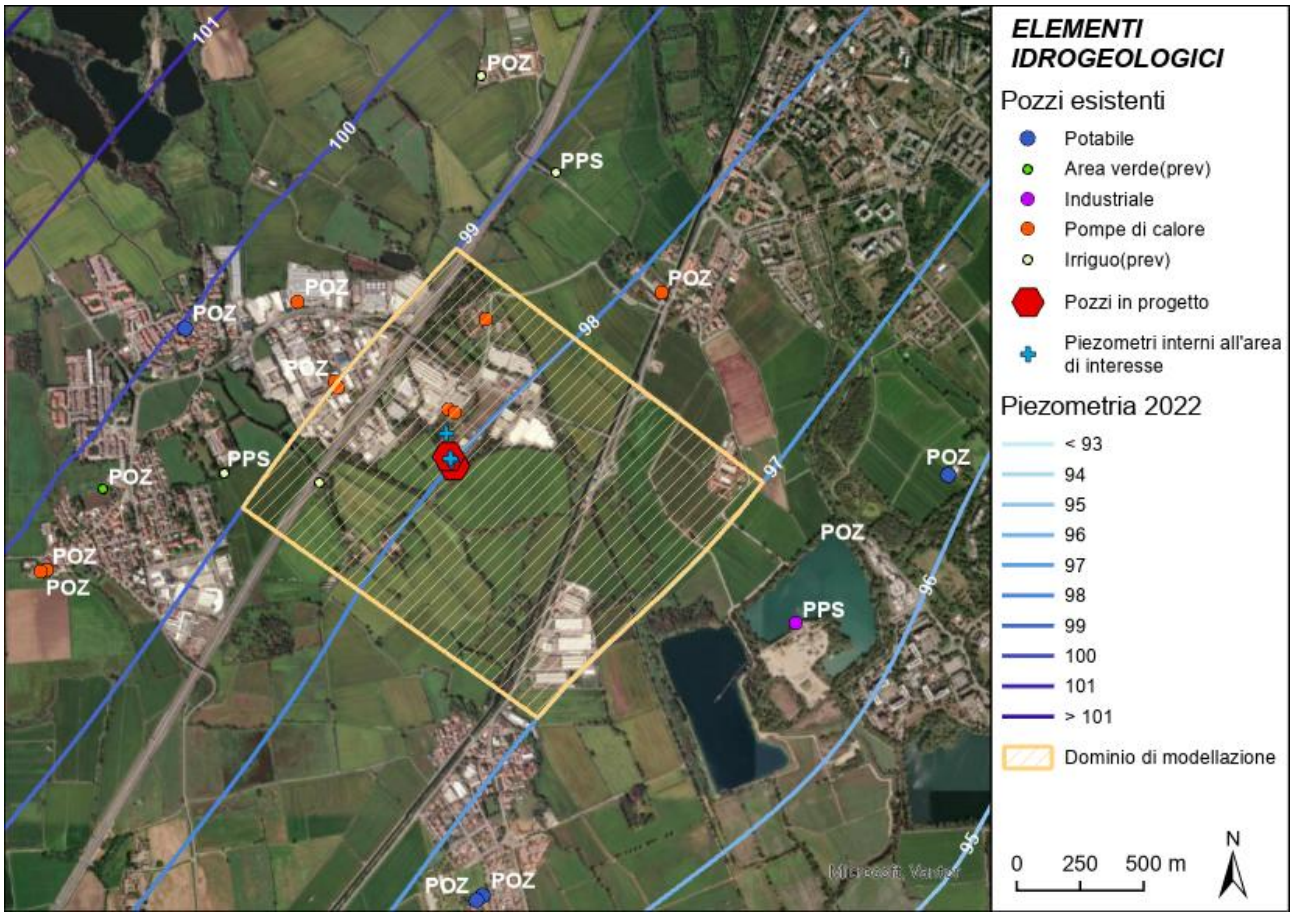

Figura 5-1. Delimitazione del dominio di modellazione e rapporti con l'assetto piezometrico locale.

5.1.1 Valori piezometrici di riferimento

Le condizioni al contorno sono state definite a partire dalla morfologia piezometrica dell'anno 2022 (mappa piezometrica più recente disponibile) e successivamente calibrate al fine di minimizzare la differenza tra i valori di carico idraulico simulati in corrispondenza dei piezometri Pz1 e Pz2 e i valori misurati nel corso della campagna piezometrica svoltasi il giorno 11/06/2026 (Tabella 5-1).

Tale calibrazione si è resa necessaria al fine di analizzare la situazione più rappresentativa dei mesi durante il quale è previsto il funzionamento dell'impianto dei pozzi. L'annata 2022, infatti, risulta caratterizzata da condizioni di anomalia negativa rispetto al regime medio osservato nel tempo (Figura 4-4). Inoltre, i valori

[2] https://www.dati.gov.it/view-dataset/dataset?id=06567149-951c-48c0-a386-8ed9e2e8aca7

piezometrici mostrano fluttuazioni stagionali imputabili alla ricarica da irrigazione dell'ordine di 1-2 m il cui massimo stagionale coincide con il periodo di attivazione dei pozzi (inizio stagione estiva) (Figura 5-2).

Alla luce di tali considerazioni, il livello piezometrico misurato in data 11/06/2026 è stato assunto come riferimento maggiormente rappresentativo delle condizioni di esercizio durante i mesi estivi.

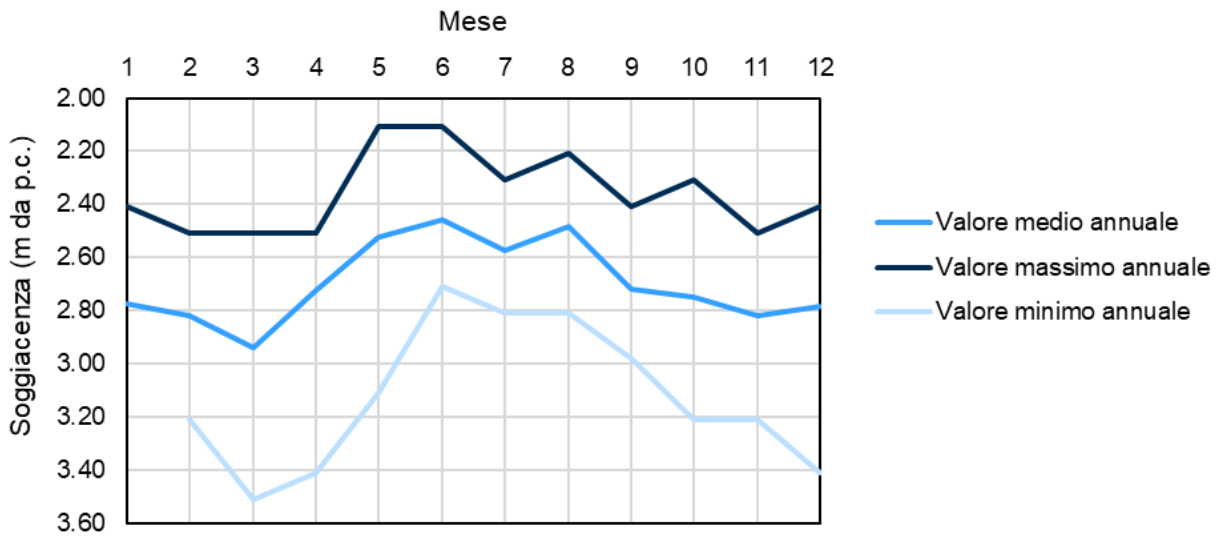

Figura 5-2. Andamento medio annuale della soggiacenza misurato dai piezometri della rete SIF nell'intorno dell'area di studio per un intervallo temporale di 18 anni.

Tabella 5-1. Coordinate e quote dei piezometri, con valore di soggiacenza misurato il giorno 11/06/2026.

Piezometro	X (UTM)	Y (UTM)	Lat (WGS84)	Long (WGS84)	Quota terreno (m s.l.m.)	Quota bocca foro (m s.l.m.)	Soggiacenza (m da b.f.)
Pz1	509830.68	5023315.96	45.363287	9.125526	100.72	100.75	1.75
Pz2	509824.94	5023324.51	45.363364	9.125453	100.64	100.56	1.49

5.1.2 Codice di calcolo

Le modellazioni sono state eseguite con il codice di calcolo ad elementi finiti FEFLOW, utilizzato per la risoluzione numerica delle equazioni di flusso per la circolazione delle acque sotterranee all'interno di un mezzo poroso.

Nel modello 3D le equazioni di flusso sono risolte dal software attraverso la discretizzazione verticale e orizzontale di elementi omogenei. La mesh 3D è suddivisa in n zone sulla base del modello geologico concettuale ottenuto nella fase precedente di lavoro. Per un acquifero freatico non confinato, il modello numerico permette di risolvere l'equazione di Darcy nei mezzi porosi, come segue:

$$\frac{\delta}{\delta x}\left(K_{xx}\frac{\delta h}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(K_{yy}\frac{\delta h}{\delta y}\right)+\frac{\delta}{\delta z}\left(K_{zz}\frac{\delta h}{\delta z}\right)+W=S_s\frac{\delta h}{\delta t}$$

dove Kxx, Kyy e Kzz [L/T] sono le componenti principali del tensore della conducibilità idraulica, assunte parallele alla direzione dei tre assi geometrici, h è il battente idraulico [L], Ss è l'immagazzinamento specifico del mezzo poroso [L-1], mentre W è la perdita o ricarica specifica rispetto al sistema acquifero [T-1].

Negli elementi non saturi posti nella parte più superficiale, la conducibilità è ridotta in funzione della parziale saturazione con un approccio semplificato, che consente di riscalare in modo lineare la K_{satura} moltiplicandola per il rapporto tra spessore della parte satura rispetto allo spessore dell'elemento. Per esempio, se l'elemento presenta una falda per 1/3 del suo spessore, la K utilizzata sarà = 0.33*K_{satura}.

La risoluzione numerica del modello di flusso è impostata secondo il codice di calcolo PARDISO (*parallel direct solver* – by O.Schenk and K. Gärtner) con un criterio di terminazione numerico di 1E-10 e un limite di 1000 iterazioni interne e 12 iterazioni esterne con tolleranza di 1E-3 (equivalente a circa 0.1 m).

5.1.3 Caratteristiche della mesh

Come riportato in Tabella 5-2, il modello 3D è strutturato in 13 superfici di nodi (slices) e 12 strati (layers). Ogni superficie consta di 22'901 nodi, per un totale di 297'713 nodi. Ogni strato consta invece di 45'418 elementi, per un totale di 545'016 elementi.

Tabella 5-2. Sommario delle caratteristiche fondamentali del modello 3D (tipo di problema, proiezione, caratteristiche e qualità della mesh)

Problem Class	
Description	Separate flow process
Type	Saturated
Projection	3D phreatic aquifer (fixed mesh)
Time Class	Transient flow
Time Stepping	Adams-Bashforth/Trapezoid rule (AB/TR) predictor-corrector
Upwinding	No upwinding
Total number of species	0
Number of chemical species	0
Mesh	
Number of Dimensions	3
Nodes per Element	6
Element Type	Triangular prism
Mesh Elements	545016
Mesh Nodes	297713
Problem Geometry	
Global Origin	
X	508210.180017388 [m]
Y	5021585.41818144 [m]
Width	2051.8 [m]
Height	1848.98 [m]
Depth	59.366 [m]
Vertical Exaggeration	1 : 1
Number of Layers	12
Number of Slices	13
Elements per Layer	45418
Nodes per Slice	22901
Mesh Quality	
Interior Holes	0
Obtuse-angled triangles	0.0% > 120°, 2.5% > 90°
Delaunay-violating triangles	0.1%

5.1.4 Condizioni al contorno e iniziali

La Figura 5-3 mostra una vista tridimensionale del dominio di modellazione in cui sono riportate le condizioni al contorno applicate, di seguito elencate:

- *Condizione al contorno di monte*: condizioni di carico (Dirichlet) con valore di carico calibrato con i dati piezometrici di giugno 2026 di 99.8 m s.l.m.;
- *Condizione al contorno di valle*: condizioni di carico (Dirichlet) con valore di carico calibrato con i dati piezometrici di giugno 2026 di 97.8 m s.l.m.;
- *Condizioni al contorno laterali*: condizioni di flusso (Neumann) con valore 0 m/s (no flusso), assumendo che il flusso sia parallelo ai lati del modello, procedendo da monte a valle;
- *Condizioni al contorno al top del modello*: condizioni di flusso (Neumann) con valore costante di infiltrazione (tale condizione è stata applicata solamente nella fase di valutazione della sostenibilità dei prelievi sul medio – lungo periodo), assunto pari a 400 mm/anno sulla base del valore di precipitazione medio annuo relativo all'area di interesse (920 mm circa[3]) e di un coefficiente di deflusso superficiale relativo all'uso del suolo in aree con copertura impermeabile del 30% (Curve Number = 0.57[4]).
- *Condizione al contorno alla base del modello*: condizioni di flusso (Neumann) con valore 0 m/s (no flusso), trascurando il flusso idrico verticale dovuto ad eventuali scambi con le unità sottostanti.

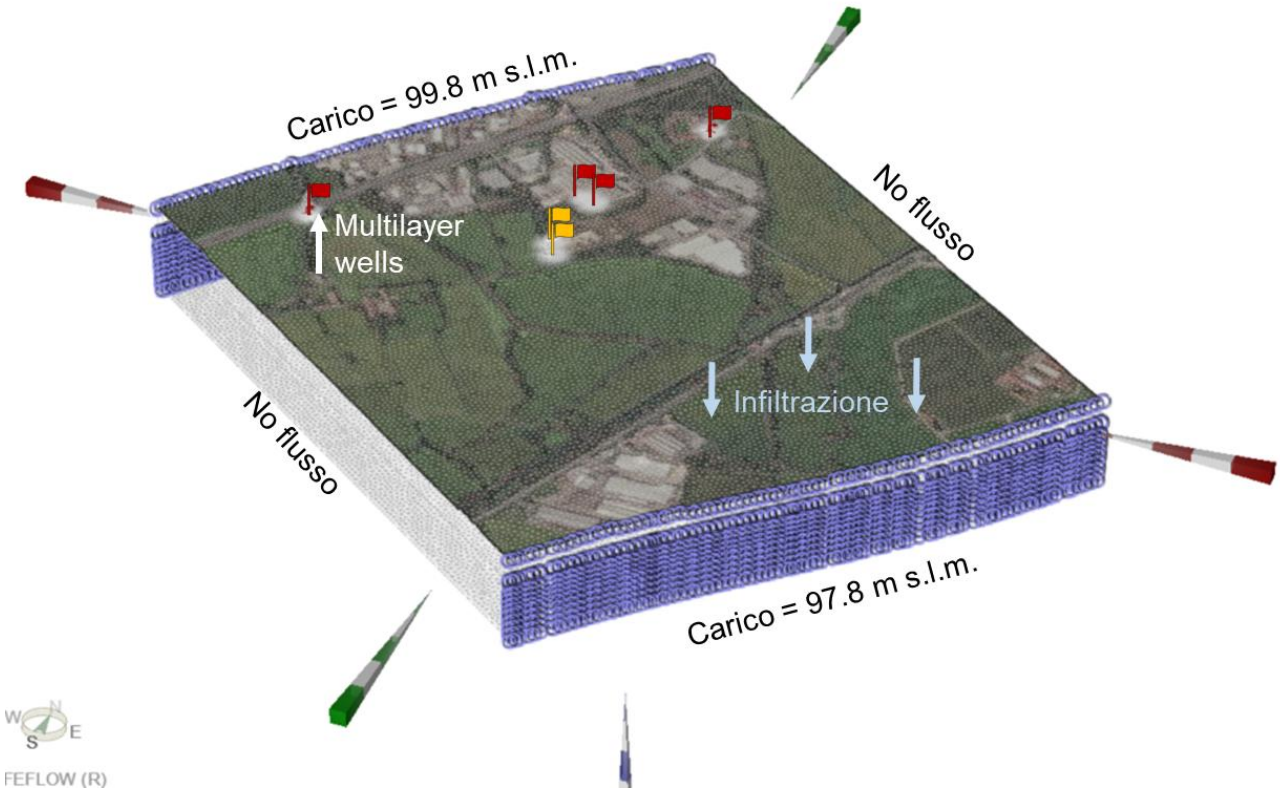

Figura 5-3. Vista tridimensionale del dominio di modellazione che illustra le condizioni al contorno applicate (esagerazione verticale x4). I pozzi già presenti nel dominio di modellazione sono indicati in rosso, mentre i pozzi in progetto sono indicati in giallo.

[3] Ceriani M., Carelli M - delle precipitazioni medie annue, massime annue e minime annue del territorio alpino lombardo. Registrate nel periodo 1891 – 1990. Regione Lombardia

[4] USDA (1972) National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology (NEH-4)

Le condizioni iniziali per i modelli che verranno sviluppati in stato transitorio considerano le condizioni al contorno costanti sopra descritte e i pozzi esistenti assumendo un regime di emungimento costante, secondo quanto riportato nella mappa dati pozzi, piezometri e punti di presa della Città Metropolitana di Milano[5]. Le caratteristiche dei pozzi considerati vengono riportate in Tabella 5-3; nella modellazione sono stati inseriti considerando la portata media costante nel tempo.

Tabella 5-3. Caratteristiche dei pozzi presenti all'interno del dominio di interesse.

Codice pozzo	Uso	Longitudine	Latitudine	Portata (l/s)	Profondità (m)	Tetto tratto filtrante (m)	Letto tratto filtrante (m)
MI03MI01524700067	Pompe di calore	9.125388	45.365097	0	30	17	29
MI03MI01524700066	Pompe di calore	9.125661	45.365005	3.65	30	17	29
MI03MI01524700082	Irriguo	9.118869	45.362503	27*	--	--	--
152470238	Pompe di calore	9.127242	45.368328	1	26	12	18

* Il database non specifica se il valore di portata corrisponda alla portata media o alla portata di picco. Considerando l'entità della portata riportata, si è ipotizzato che tale valore corrisponda alla portata di picco, a partire dal quale si è ipotizzato un valore di portata media pari a 4 l/s.

5.1.5 Parametri idraulici

Le proprietà attribuite alla *mesh* sono state stabilite sulla base del modello geologico/concettuale riportato al paragrafo "*Parametrizzazione dell'acquifero*" che individua un'alternanza di depositi a buona permeabilità e depositi a granulometria fine meno permeabili (Figura 4-6). In particolare, la stratigrafia è stata suddivisa in 6 orizzonti di cui 3 unità permeabili e 3 acquitardi. Non disponendo di prove idrogeologiche di sito, è stata considerata la possibile variabilità della conducibilità idraulica degli acquiferi assumendo il valore minimo e massimo che tale parametro può assumere nell'area di interesse:

- per gli acquiferi: $K_{h\text{ - min}} = 1\times10^{-4}$ m/s, e una $K_{h\text{ - max}} = 5\times10^{-4}$ m/s;
- per gli acquitardi: $K_h = 1\times10^{-5}$ m/s.

Per tutte le unità è stato impostato un rapporto K_v / K_h pari a 0.5. Tali valori sono stati desunti sulla base delle caratteristiche granulometriche degli orizzonti stratigrafici presenti. Tali dati saranno validati da prove eseguite in sito sui pozzi in progetto.

Non avendo disponibilità di informazioni stratigrafiche aggiuntive all'interno del dominio di modellazione in grado di confermare o smentire la continuità degli acquitardi individuati nelle indagini mostrate in (Figura 4-6), si è deciso di adottare un approccio cautelativo al fine della valutazione dell'impatto quantitativo considerando gli strati perfettamente continui all'interno di tutto il dominio di modellazione. Questo approccio è da considerarsi cautelativo dal punto di vista degli abbassamenti causati dallo sfruttamento della falda poiché la condizione proposta di acquiferi parzialmente isolati riduce la sezione disponibile al flusso e determina abbassamenti maggiori rispetto ad una possibile condizione di acquifero totalmente o parzialmente libero con acquitardo discontinuo.

[5] https://www.dati.lombardia.it/Ambiente/CITTA-METROPOLITANA-MILANO-Mappa-Dati-Pozzi-Piezom/t56u-mkqh

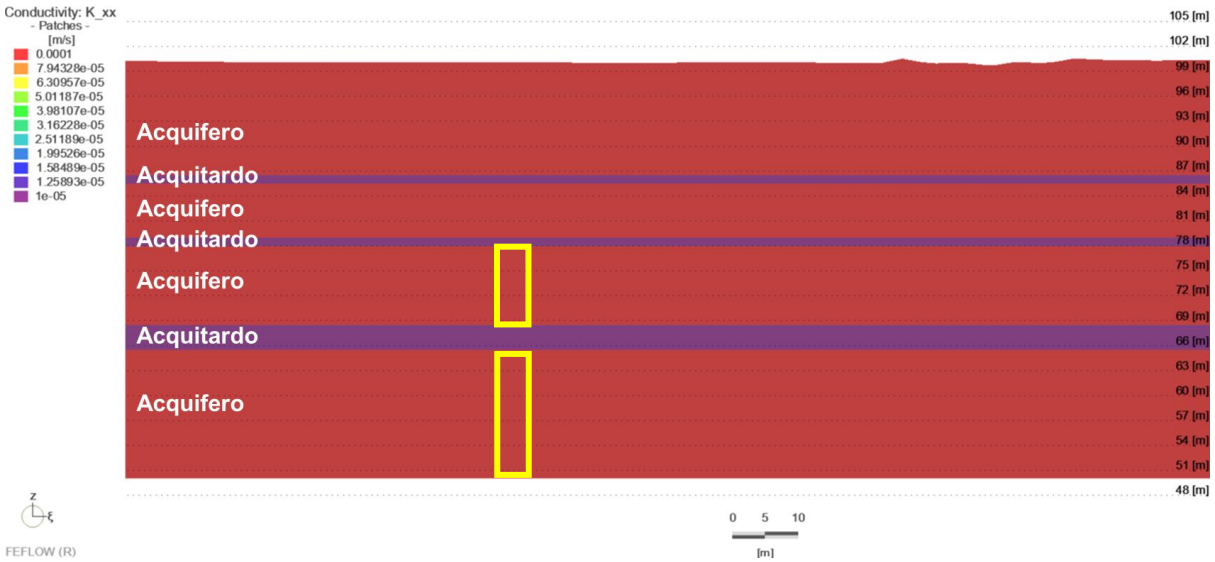

Figura 5-4. – Distribuzione delle conducibilità orizzontali all'interno del modello, lungo una sezione orientata NW – SE (esagerazione verticale x4). I rettangoli in giallo evidenziano gli intervalli di profondità in cui verranno realizzati i tratti filtrati dei pozzi in progetto.

5.1.6 Calibrazione del modello

La calibrazione del modello è stata eseguita manualmente mediante modifica delle condizioni di carico idraulico al contorno, al fine di minimizzare la differenza tra i valori di carico idraulico simulati e osservati in corrispondenza dei piezometri Pz1 e Pz2. Le differenze tra il carico osservato e simulato sono riportate in Tabella 5-4.

Tabella 5-4. Residui ottenuti a seguito della fase di calibrazione del modello per gli scenari Kmin e Kmax.

Piezometro	Carico osservato (m s.l.m.)	Carico simulato Kmin (m s.l.m.)	Carico simulato Kmax (m s.l.m.)	Residuo Kmin (m)	Residuo Kmax (m)
Pz1	99	99.012	99.029	0.012	0.028
Pz2	99.07	99.025	99.042	0.04	0.027

5.1.7 Strategia di modellazione

Per analizzare l'effetto dei pozzi in progetto è stata in primo luogo calcolata la distribuzione iniziale del carico idraulico in condizioni di K_{min} e K_{max}.

A partire da tali condizioni iniziali sono stati analizzati i seguenti scenari in cui viene valutato l'abbassamento piezometrico rispetto alle condizioni iniziali e la distribuzione del carico idraulico durante il funzionamento dei pozzi:

- S1a: analisi dell'andamento medio del livello di falda in **condizioni transitorie**, considerando i pozzi attualmente presenti nell'area di interesse e i **pozzi di progetto attivi con regime on/off per 5 ore al giorno per un periodo di 30, 60 e 90 giorni (21 l/s tot)** (Figura 5-5), considerando i **valori massimi di conducibilità idraulica** per gli acquiferi;
- S1b: analisi dell'andamento medio del livello di falda in **condizioni transitorie**, considerando i pozzi attualmente presenti nell'area di interesse e i **pozzi di progetto attivi con regime on/off per 5 ore al giorno per un periodo di 30, 60 e 90 giorni (21 l/s tot)** (Figura 5-5), considerando i **valori minimi di conducibilità idraulica** per gli acquiferi;
- S2: analisi dell'andamento medio del livello di falda in **condizioni stazionarie,** considerando i pozzi attualmente presenti nell'area di interesse e i **pozzi di progetto attivi con portata media (2.7 l/s tot)**, considerando i **valori minimi di conducibilità idraulica** per gli acquiferi e la **ricarica** dovuta alle precipitazioni.

Per quanto concerne l'utilizzo dei pozzi, sono stati definiti tre durate di utilizzo pari a 30, 60 e 90 giorni, tali intervalli di esercizio sono così definiti:

- La durata di 60 giorni è stata adottata quale condizione rappresentativa dei volumi di utilizzo previsti e oggetto di concessione (pari a 24.000 m³/anno, vedi capitolo 4.1.5).
- La durata di 30 giorni/anno è stata analizzata al fine di valutare l'evoluzione temporale degli abbassamenti piezometrici nelle fasi iniziali di esercizio e di fornire un confronto con condizioni di utilizzo più contenute.
- Lo scenario di 90 giorni/anno, *worst case scenario*, pur non rappresentando una condizione operativa prevista né un volume oggetto di concessione, è stato introdotto a fini esclusivamente cautelativi per valutare la risposta del sistema in condizioni di esercizio particolarmente gravose. La durata di 90 giorni è stata definita assumendo, in via conservativa, il funzionamento pressoché continuo del sistema durante l'intera stagione estiva (giugno–agosto), in considerazione delle proiezioni climatiche di lungo termine (2081–2100). Tali proiezioni indicano un incremento delle temperature estive, con valori della temperatura massima media giornaliera pari a circa 28.7 °C nello scenario SSP2-4.5 e 32.3 °C nello scenario SSP5-8.5[6]. Sebbene tali indicatori climatici non consentano una stima diretta dei futuri fabbisogni di esercizio dell'impianto, essi evidenziano condizioni termiche potenzialmente più severe rispetto a quelle attuali. In tale contesto, l'ipotesi di funzionamento continuo per l'intera stagione estiva è stata adottata quale scenario limite finalizzato alla verifica della robustezza del modello idrogeologico e alla valutazione degli effetti dell'emungimento in condizioni cautelative, senza che ciò costituisca una previsione delle effettive modalità di esercizio future.

La tabella sottostante riassume le condizioni impostate per gli scenari analizzati:

Tabella 5-5. Caratteristiche degli scenari di modellazione

Scenario	Cond. Idraulica	Portata	Scenario	Periodo	Ricarica
S1a	Massima ($5*10^{-4}$ m/s)	Picco (10.5 l/s /pozzo x 5h/gg)	Transitorio	30, 60, 90 giorni	No
S1b	Minima ($1*10^{-4}$ m/s)	Picco (10.5 l/s /pozzo x 5h/gg)	Transitorio	30, 60, 90 giorni	No
S2	Minima ($1*10^{-4}$ m/s)	Media (1.35 l/s /pozzo)	Stazionario	30, 60, 90 giorni	Si (400 mm/a)

[6] I dati relativi alla temperatura massima media giornaliera (Mean of daily maximum temperature) derivano dal dataset Copernicus Climate Change Service (C3S), basato sulle simulazioni climatiche del programma Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). L'indicatore rappresenta la media estiva (giugno, luglio e agosto) della temperatura massima giornaliera dell'aria a 2 m dal suolo, ottenuta a partire dalle medie mensili del dataset C3S Atlas. Le proiezioni sono riferite allo scenario climatico SSP2-4.5 e SSP5-8.5, che rappresentano rispettivamente uno scenario intermedio di sviluppo socioeconomico ("middle of the road"), caratterizzato dal raggiungimento di emissioni nette di CO_2 pari a zero nella seconda metà del secolo e uno scenario ad alte emissioni caratterizzato da uno sviluppo socioeconomico fortemente dipendente dai combustibili fossili e dall'assenza di ulteriori politiche climatiche. I risultati fanno riferimento al periodo di lungo termine 2081–2100 e sono stati elaborati utilizzando un ensemble di modelli climatici globali CMIP6 (tra cui AWI-CM-1-1-MR, CanESM5, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 e altri), con risoluzione spaziale tipica di circa 100 km. Le elaborazioni sono coerenti con il quadro metodologico adottato nel Sesto Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR6).

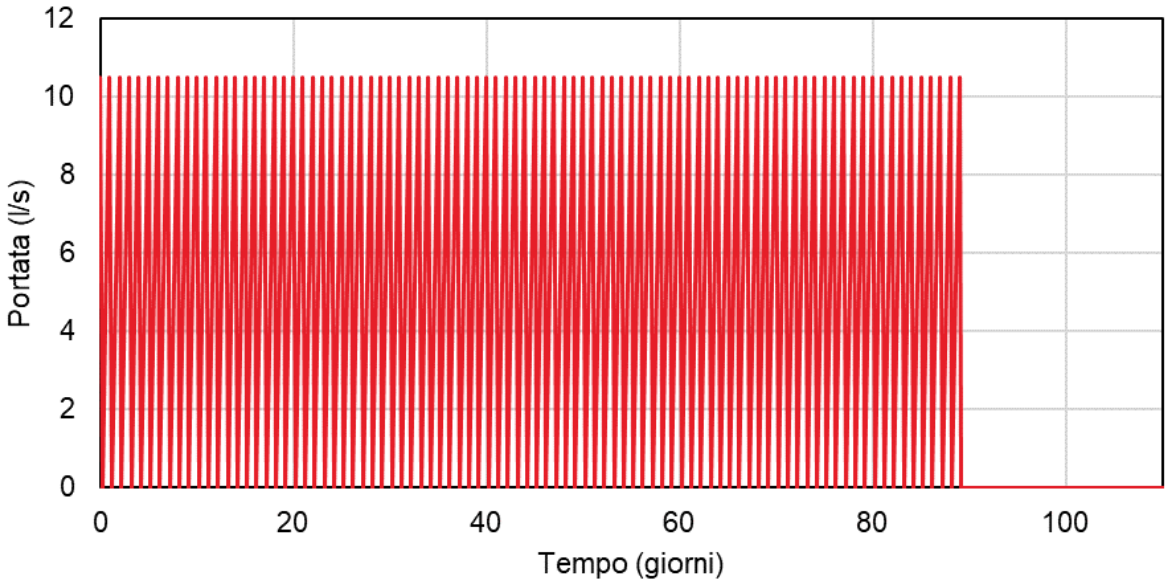

Figura 5-5. Serie temporale dei prelievi in corrispondenza di ciascun pozzo in progetto nello scenario più cautelativo (90 giorni), utilizzata per stimare gli abbassamenti durante le condizioni di picco.

6. Risultati della modellazione idrogeologica

Si riportano di seguito i risultati della modellazione in termini di distribuzione di carico idraulico e di abbassamenti rispetto alle condizioni iniziali durante l'emungimento in corrispondenza della profondità media del tratto filtrato dei pozzi in progetto. La rappresentazione a tale profondità mostra il massimo abbassamento atteso, che risulta maggiore rispetto all'abbassamento indotto agli strati più superficiali per effetto del parziale isolamento idraulico degli orizzonti.

La seguente tabella riassume i valori di abbassamento in pozzo e a 100 m di distanza dal pozzo simulati per i diversi scenari considerati:

Tabella 6-1. Valori massimi di abbassamento in pozzo e a 100 m distanza per i diversi scenari simulati.

Scenario	Cond. Idraulica	In pozzo		100m a nord	100m a est	Durata
		In funzione (m)*	Spegnimento (m)**	In funzione (m)	In funzione (m)	
S1a	MASSIMA	1.15	0.05	0.06	0.07	30gg
		1.16	0.06	0.07	0.07	60gg
		1.16	0.06	0.07	0.08	90gg
S1b	MINIMA	4.99	0.21	0.20	0.24	30gg
		5.04	0.26	0.25	0.29	60gg
		5.07	0.29	0.28	0.32	90gg

*Valori di abbassamento piezometrico nel pozzo a 5 ore di esercizio;
** Valori piezometrici nel pozzo dopo 19 ore dalla cessazione del pompaggio.

I risultati riportati evidenziano che gli abbassamenti simulati dipendono principalmente dalle caratteristiche idrauliche dell'acquifero, mentre risultano solo debolmente influenzati dalla durata del pompaggio. Nello scenario S1a, riferito a condizioni di massima conducibilità idraulica, gli abbassamenti sono molto contenuti, con valori di circa 1.15–1.16 m in pozzo e inferiori a 0.08 m nei punti di osservazione posti a 100 m. Nello scenario S1b, relativo alla minima conducibilità idraulica, gli abbassamenti in pozzo raggiungono valori compresi tra 4.99 e 5.07 m, mentre a 100 m di distanza rimangono compresi tra 0.20 e 0.32 m. In entrambi gli scenari l'incremento degli abbassamenti al crescere della durata di pompaggio da 30 a 90 giorni risulta limitato.

I dati di abbassamento simulati in corrispondenza dei pozzi già presenti all'interno del dominio di modellazione sono riportati in Tabella 6-2 per gli scenari considerati.

Tabella 6-2. Abbassamenti simulati in corrispondenza dei pozzi esistenti per gli scenari considerati

Codice pozzo	Profondità (m)	Tetto filtri (m)	Letto filtri (m)	Abbassamento (m)					
				S1a			S1b		
				30gg	60gg	90gg	30gg	60gg	90gg
MI03MI01524700067	30	17	29	0.05	0.06	0.06	0.11	0.15	0.18
MI03MI01524700066	30	17	29	0.05	0.06	0.06	0.12	0.16	0.19
MI03MI01524700082	--	--	--	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.04
152470238	26	12	18	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05

I risultati evidenziano abbassamenti nei pozzi limitrofi sono generalmente contenuti in tutti i casi analizzati. Nello scenario S1a i valori risultano compresi tra 0.01 e 0.06 m, mentre nello scenario S1b variano tra 0.01 e 0.19 m, con i massimi registrati nei pozzi MI03MI01524700067 e MI03MI01524700066. Anche nella condizione più cautelativa, le interferenze simulate restano modeste e non tali da compromettere la funzionalità delle captazioni esistenti.

I paragrafi seguenti mostrano in dettaglio l'estensione spaziale e l'entità degli abbassamenti simulati per i pozzi in progetto considerando i diversi scenari.

Considerato che le differenze tra gli abbassamenti calcolati per le varie durate di esercizio risultano limitate, ai fini di una più agevole lettura dei risultati si riportano esclusivamente le elaborazioni relative allo scenario con durata di pompaggio pari a 90 giorni, ritenuto rappresentativo del *worst case scenario*, e quindi il più cautelativo.

La Figura 6-1 mostra la posizione dei punti di controllo per cui verranno mostrati gli abbassamenti indotti dal funzionamento dei pozzi.

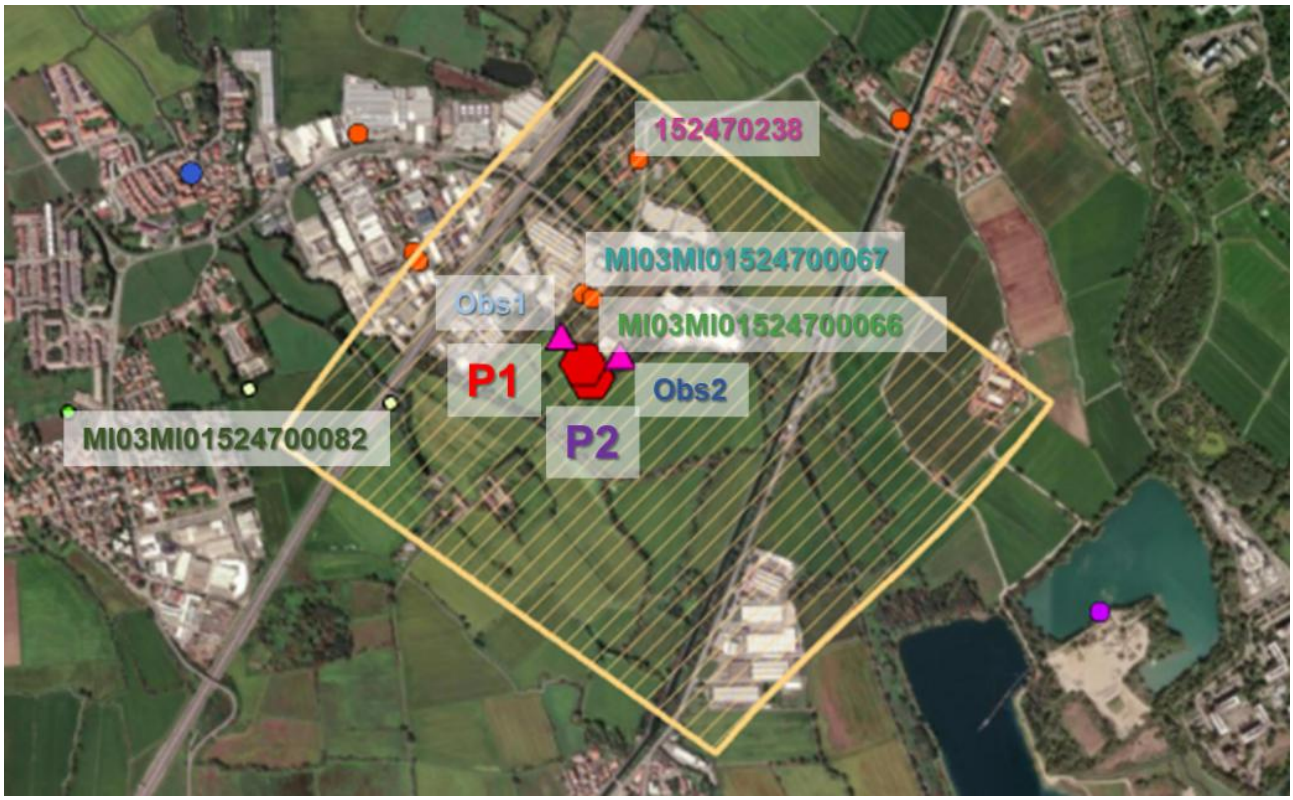

Figura 6-1. Posizione dei punti di monitoraggio inseriti nel dominio di modellazione.

6.1.1 Scenario S1a (elevata conducibilità idraulica)

La Figura 6-2 mostra la distribuzione del carico idraulico simulato considerando i pozzi in progetto e i valori di abbassamento rispetto alle condizioni in assenza dei pozzi. Tale scenario rappresenta la condizione di conducibilità idraulica massima ($K = 5\times10^{-4}$ m/s) e considera il regime di emungimento di picco in stato transitorio pari a 10.5 l/s per ciascun pozzo per 5h/giorno.

Le condizioni di funzionamento massime sono state simulate per 90 giorni consecutivi, considerando un *worst case scenario* in cui permanga la richiesta massima per tre mesi consecutivi estivi. Tale condizione è comunque cautelativa perché il periodo di funzionamento a tale regime è inferiore a quanto simulato. La Figura 6-2 a sinistra mostra l'impatto durante il funzionamento dei pozzi al 90esimo giorno, mentre la Figura 6-2 a destra mostra l'impatto al 90esimo giorno immediatamente dopo lo spegnimento dei pozzi.

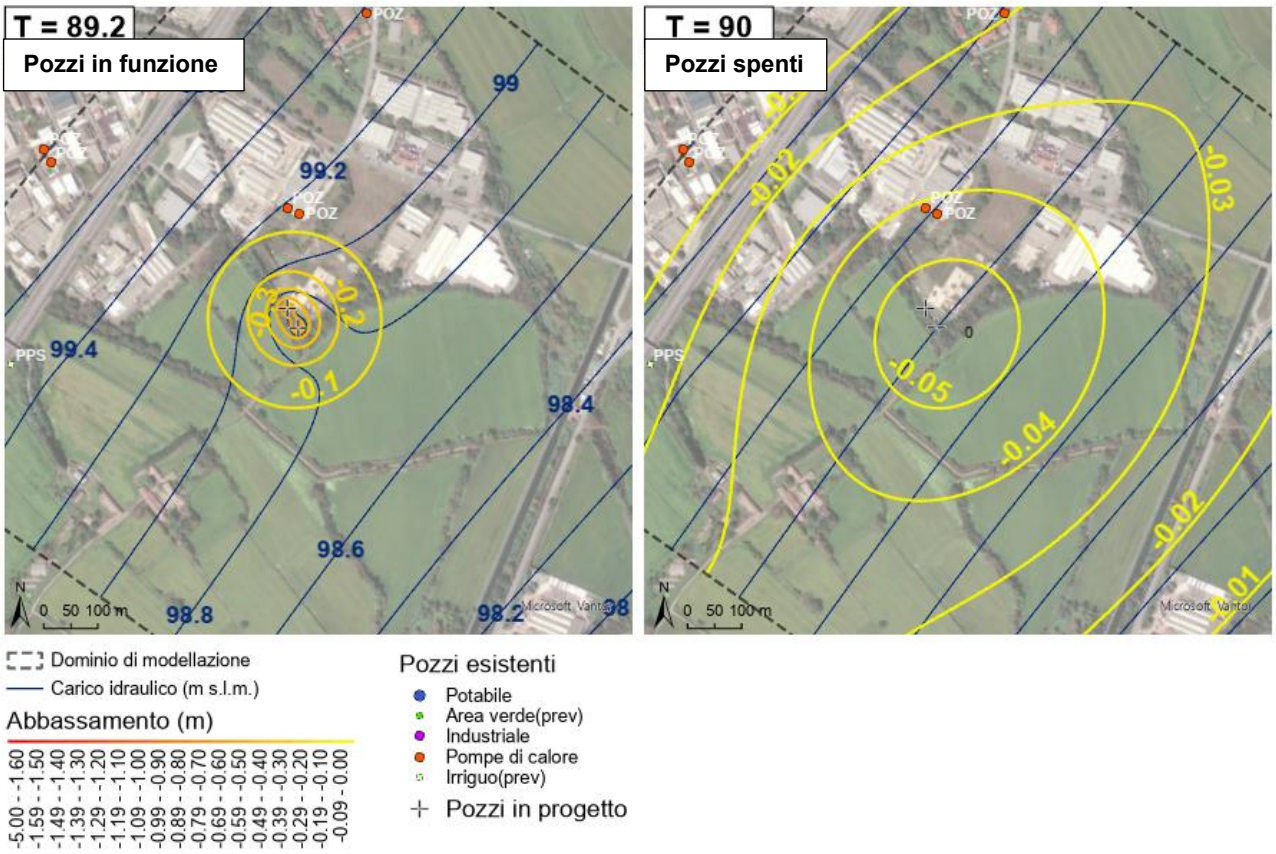

Figura 6-2. Abbassamento della superficie piezometrica simulato in corrispondenza del punto medio del tratto filtrante dei pozzi in progetto al tempo T = 89.2 giorni (termine dell'ultima fase di accensione dell'impianto) e al tempo T = 90 giorni (spegnimento dell'impianto) in condizioni di alta conducibilità idraulica degli acquiferi.

I grafici in Figura 6-3 mostrano l'andamento del carico idraulico nel tempo durante la simulazione in stato transitorio per i 90 giorni di simulazione in condizioni di picco e per successivi 275 a pozzi spenti (recupero). Nel riquadro a) e b) si mostrano gli abbassamenti in pozzo, mentre i riquadri c) e d) mostrano gli abbassamenti nei punti di osservazione OBS (vedi Figura 6-1) e in prossimità dei pozzi esistenti, rispettivamente. Gli abbassamenti relativi rispetto al valore di carico in assenza dei pozzi sono riportati in Tabella 6-1 e Tabella 6-2.

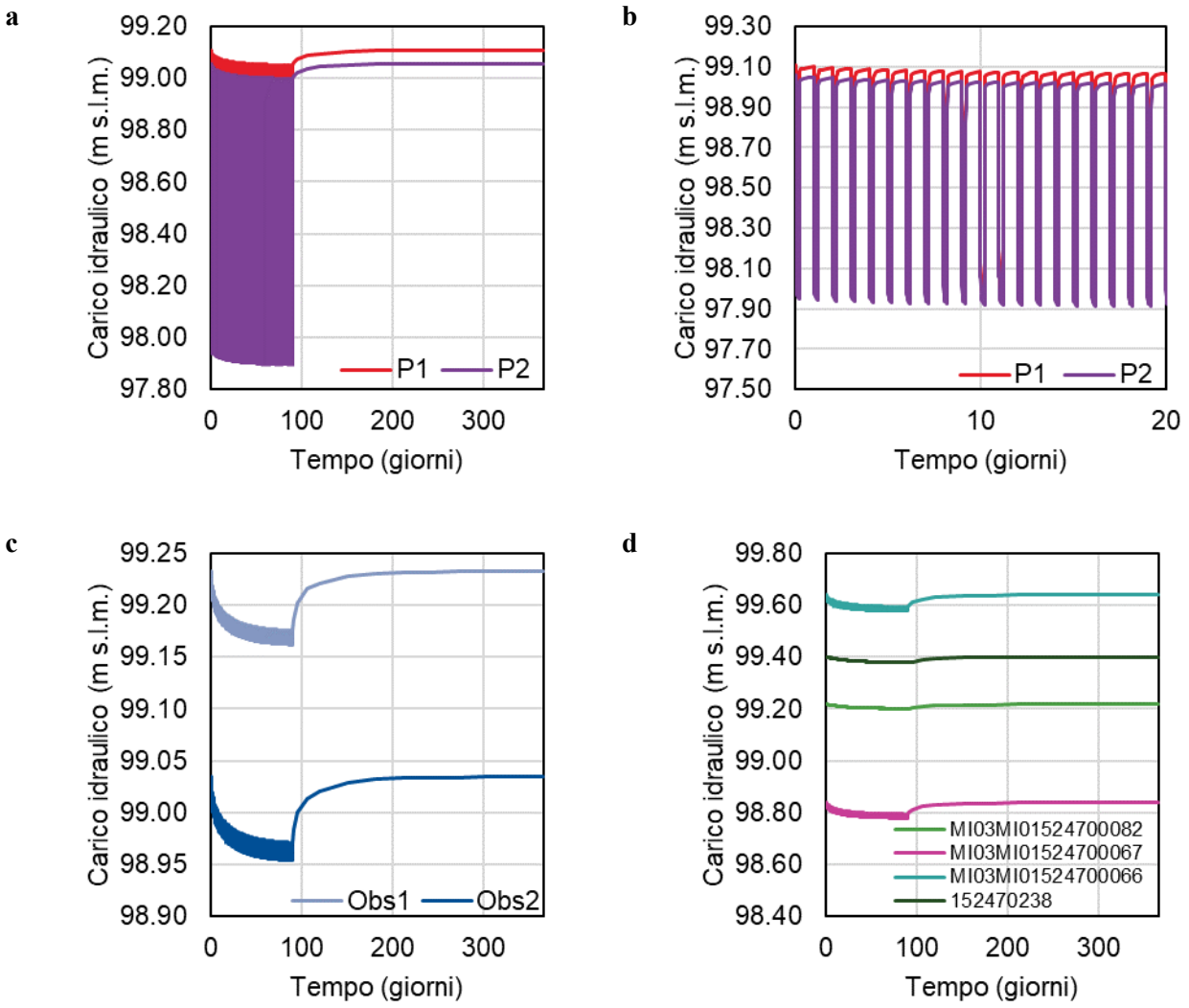

Figura 6-3. Andamento del carico idraulico nel tempo (scenario Kmax) per un intervallo di simulazione della durata di 365 giorni di cui i primo 90 con funzionamento in condizioni di picco (10.5 l/s per pozzo per 5h/giorno): (a) abbassamento in pozzo P1 e P2, (b) visione di dettaglio sui primi 20 giorni; (c) in corrispondenza di due punti di osservazione posti a una distanza di 100 m a monte e verso est rispetto ai pozzi; (d) in corrispondenza dei pozzi esistenti compresi entro il dominio di modellazione.

6.1.2 Scenario S1b (bassa conducibilità idraulica)

La Figura 6-4 mostra la distribuzione del carico idraulico simulato considerando i pozzi in progetto e i valori di abbassamento rispetto alle condizioni in assenza dei pozzi. Tale scenario rappresenta la condizione di conducibilità idraulica minima ($K = 1\times10^{-4}$ m/s) e considera il regime di emungimento di picco in stato transitorio pari a 10.5 l/s per ciascun pozzo per 5h/giorno.

Le condizioni di funzionamento massime sono state simulate per 90 giorni consecutivi, considerando un *worst case scenario* in cui permanga la richiesta massima per tre mesi estivi. Tale condizione è comunque cautelativa perché il periodo di funzionamento a tale regime è inferiore a quanto simulato. La Figura 6-4 a sinistra mostra l'impatto durante il funzionamento dei pozzi al 90esimo giorno, mentre la Figura 6-4 a destra mostra l'impatto al 90esimo giorno immediatamente dopo lo spegnimento dei pozzi.

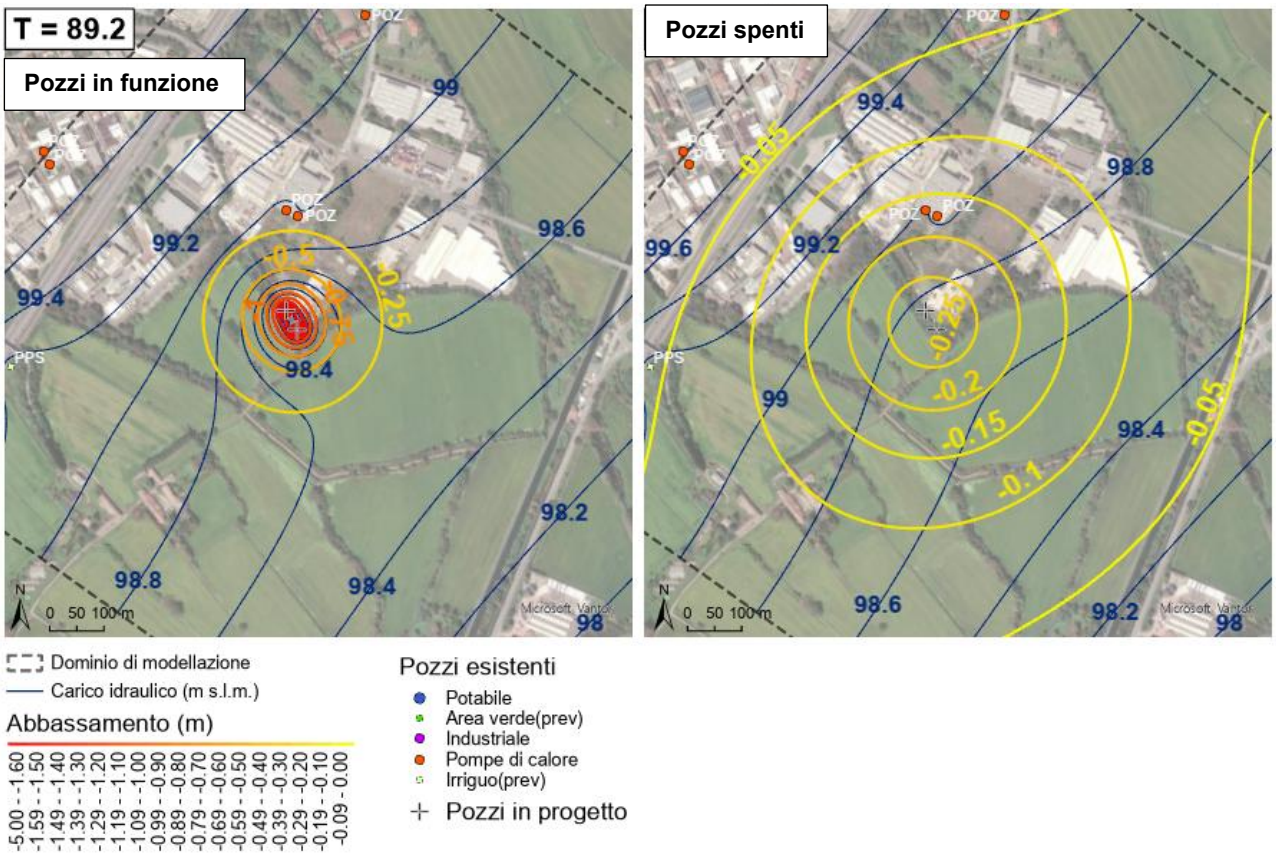

Figura 6-4. Abbassamento della superficie piezometrica simulato in corrispondenza del punto medio del tratto filtrante dei pozzi in progetto al tempo T = 89.2 giorni (termine dell'ultima fase di accensione dell'impianto) e al tempo T = 90 giorni (spegnimento dell'impianto) in condizioni di bassa conducibilità idraulica degli acquiferi.

I grafici in Figura 6-5 mostrano l'andamento del carico idraulico nel tempo durante la simulazione in stato transitorio per i 90 giorni di simulazione in condizioni di picco e per successivi 275 giorni a pozzi spenti (recupero). Nel riquadro a) e b) si mostrano gli abbassamenti in pozzo, mentre i riquadri c) e d) mostrano gli abbassamenti nei punti di osservazione OBS (vedi Figura 6-1) e in prossimità dei pozzi esistenti, rispettivamente. Gli abbassamenti relativi rispetto al valore di carico in assenza dei pozzi sono riportati in Tabella 6-1 e Tabella 6-2.

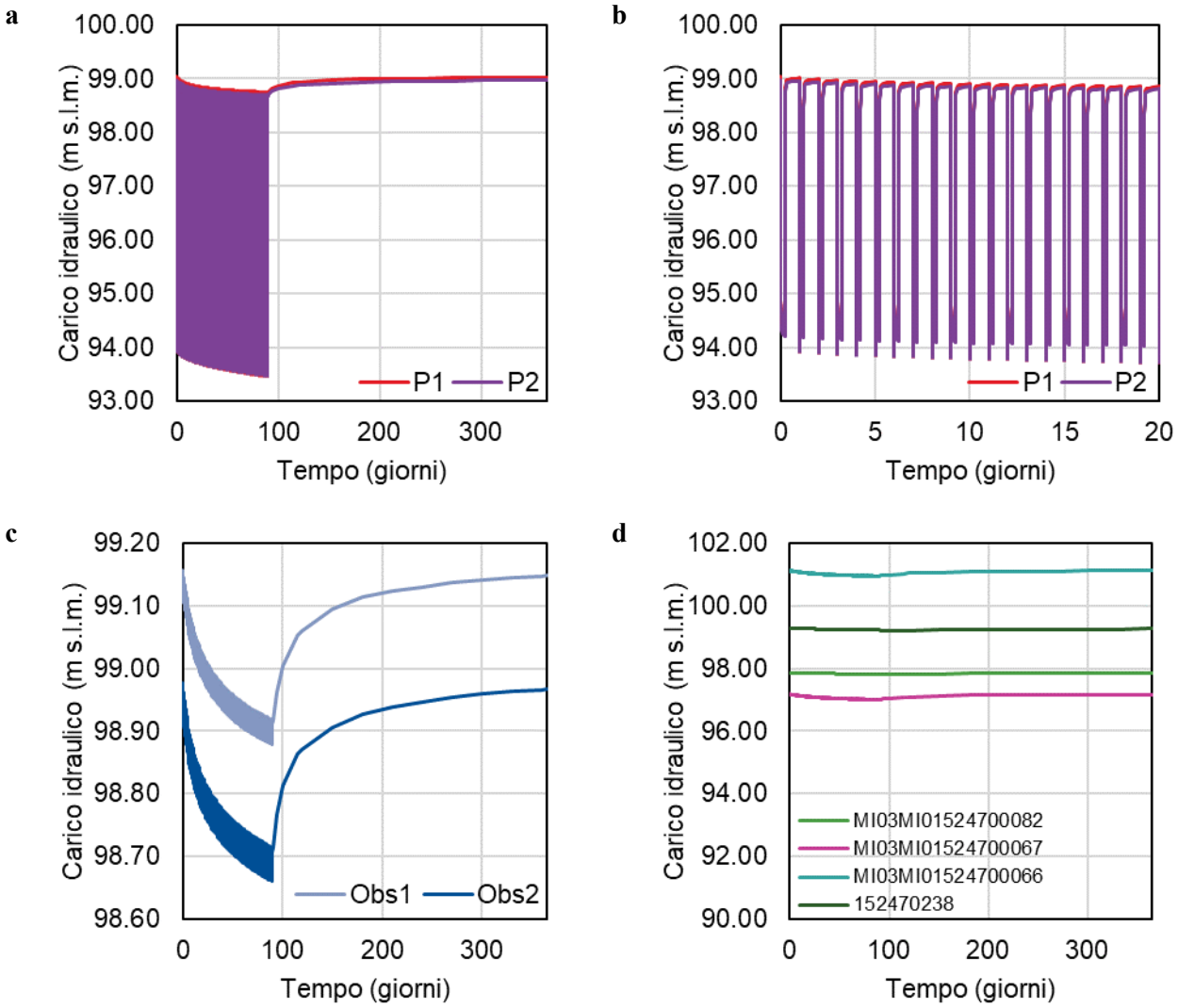

Figura 6-5. Andamento del carico idraulico nel tempo in condizioni di Kmin in corrispondenza del tratto filtrato dei pozzi in progetto per un intervallo di simulazione della durata di 365 giorni (a) e con una visione di dettaglio sui primi 20 giorni (b); andamento del carico idraulico nel tempo in corrispondenza di due punti di osservazione posti a una distanza di 100 m a monte e verso est rispetto all'impianto di progetto (c); andamento del carico idraulico nel tempo in corrispondenza dei pozzi già presenti entro il dominio di modellazione (d).

6.1.3 Scenario S2 (sostenibilità dei prelievi a lungo termine)

Al fine di valutare la sostenibilità degli emungimenti previsti rispetto al regime idrogeologico dell'area di studio, è stato sviluppato un ulteriore scenario di simulazione (S2) che considera, oltre ai prelievi dei pozzi, anche la ricarica media annua dell'acquifero. Quest'ultima è stata stimata pari a 400 mm/a come descritto in precedenza (cfr capitolo 5.1.4).

A differenza degli scenari precedenti, finalizzati alla valutazione degli effetti transitori del pompaggio, lo scenario S2 è stato simulato in condizioni stazionarie, rappresentative dell'assetto di equilibrio che il sistema idrogeologico tende a raggiungere nel medio-lungo periodo.

L'analisi del bilancio idrogeologico del modello, riportata in Figura 6 6, ha consentito di quantificare i principali flussi in ingresso e in uscita dall'area modellata. I valori positivi rappresentano gli apporti al sistema, mentre quelli negativi rappresentano le uscite.

I risultati evidenziano che la principale fonte di alimentazione dell'acquifero è costituita dalla ricarica diffusa (condizioni di Neumann), che fornisce un contributo pari a circa +24.7 l/s. A tale contributo si sommano gli apporti derivanti dalle condizioni al contorno poste a monte idrogeologico (+1.7 l/s) e la restituzione di acqua associata al pozzo di resa dell'impianto geotermico a nord del sito (+3.7 l/s).

Le principali uscite dal sistema sono rappresentate dal naturale deflusso della falda, valutate attraverso le condizioni al contorno di Dirichlet (-18.7 l/s) e dai prelievi tramite pozzi (-11.4 l/s), all'interno dei quali il contributo dei soli pozzi in progetto è pari a circa -2.7 l/s.

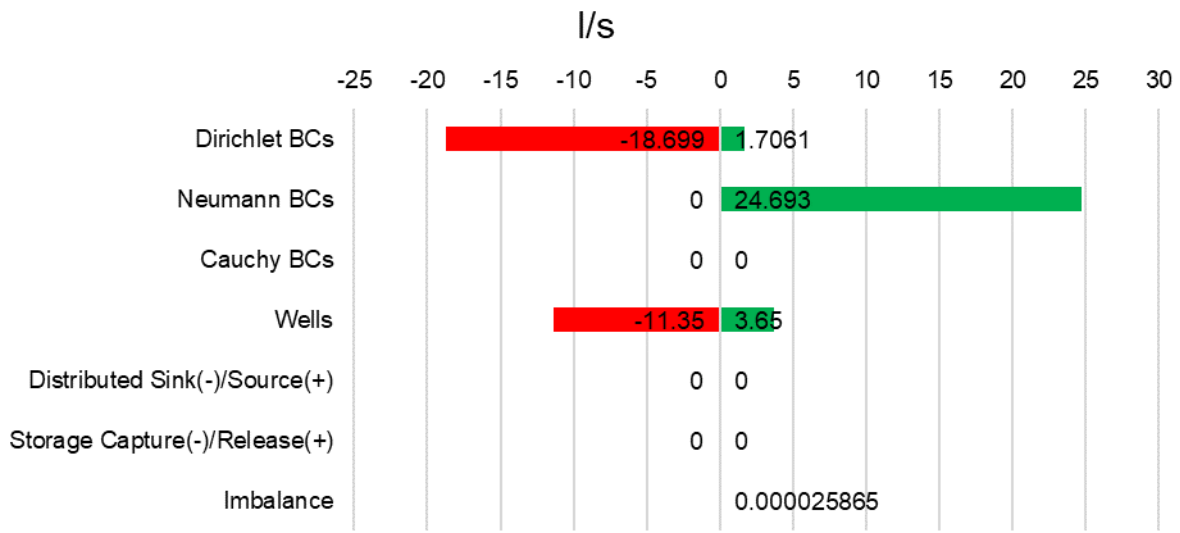

Figura 6-6. Bilancio idrogeologico del modello per la valutazione dell'influenza dei nuovi pozzi nel medio – lungo termine. I valori negativi si riferiscono a uscite dal modello e quelli positive alle entrate. Le condizioni al contorno di Dirichlet sono quelle a monte e valle del modello. La condizione di Neumann è riferita alla ricarica e la condizioni Wells è riferita ai pozzi (il valore positivo è dovuto al pozzo di resa dell'impianto geotermico presente nell'area del modello).

Il confronto tra le diverse componenti del bilancio mostra come il prelievo associato ai nuovi pozzi rappresenti una quota limitata rispetto agli apporti naturali disponibili. In particolare, la sola ricarica naturale risulta significativamente superiore ai volumi emunti, garantendo il mantenimento dell'equilibrio idrogeologico del sistema. Inoltre, il cono di depressione generato dal pompaggio favorisce il richiamo di ulteriori apporti idrici dalle aree circostanti, sia lungo la direzione principale di flusso della falda sia lateralmente, contribuendo al riequilibrio del bilancio.

Occorre inoltre considerare, che tali rapporti sono anche soggetti a un fattore di scala, poiché analizzando una porzione più estesa di territorio, le voci in ingresso aumenteranno per aumento dell'area/volume di competenza; inoltre, dall'analisi delle opere di captazione presenti nell'intorno del sito non emergono elementi che possano determinare interferenze significative o costituire ulteriori importanti termini di uscita dal sistema. In particolare, il censimento dei pozzi limitrofi non ha evidenziato la presenza di captazioni rilevanti nel raggio di almeno 1 km dall'area di intervento.

Alla luce dei risultati ottenuti, si ritiene che i prelievi previsti siano compatibili con le capacità di alimentazione dell'acquifero e non determinino alterazioni significative delle condizioni di circolazione idrica sotterranea. Pertanto, la sostenibilità degli emungimenti nel medio-lungo periodo può considerarsi verificata.

7. Considerazioni finali

La modellazione idrogeologica ha quantificato gli effetti dei nuovi pozzi di progetto nelle condizioni idrauliche limite individuate (K_{min} e K_{max}), sia in termini di abbassamenti piezometrici locali sia di interferenza con i pozzi esistenti.

Nello scenario di progetto più conservativo analizzato, caratterizzato da bassa conducibilità idraulica dell'acquifero ($K = 1\times10^{-4}$ m/s), massimo regime di utilizzo previsto (21 l/s) e una durata di 60 giorni, gli abbassamenti massimi all'interno dei pozzi raggiungono valori dell'ordine di 5.4 m. Al di fuori dell'area di captazione, l'entità del cono di depressione si riduce, con abbassamenti compresi tra circa 0.25 m e 0.29 m nei punti di osservazione posti a 100 m dall'area di intervento. Negli scenari caratterizzati da maggiore conducibilità idraulica ($K = 5\times10^{-4}$ m/s), gli abbassamenti risultano ulteriormente contenuti, attestandosi intorno a 0.07 m alla medesima distanza.

Le interferenze sui pozzi esistenti risultano trascurabili. Le simulazioni indicano infatti abbassamenti massimi previsti inferiori a circa 0.16 m presso le captazioni censite nell'intorno del sito, valori che non sono tali da compromettere la funzionalità delle opere o modificare in modo significativo le condizioni di sfruttamento della falda. Tale risultato assume particolare rilevanza considerando che le condizioni simulate corrispondono a una situazione cautelativa, con emungimento contemporaneo dei due pozzi alla portata massima complessiva prevista pari a 21 l/s che non tiene conto della riduzione della richiesta di emungimento a valle dell'attivazione del trattamento acque. Si evidenzia inoltre che tale regime di esercizio rappresenta una condizione di punta, limitata ai periodi di maggiore richiesta estiva e non continuativa nel corso dell'anno.

Sotto il profilo della sostenibilità, il bilancio idrogeologico del modello indica che il prelievo simulato è inferiore agli apporti naturali al sistema acquifero, confermando l'assenza di condizioni di stress quantitativo significativo. La sostenibilità dei prelievi nel medio-lungo periodo è pertanto verificata, anche in relazione agli usi concorrenti insistenti sulla medesima falda.

Alla luce della caratterizzazione idrogeologica del sito, delle condizioni piezometriche osservate e delle simulazioni effettuate, la sostenibilità dei prelievi può essere valutata considerando congiuntamente i seguenti elementi quantitativi e idrogeologici:

- il volume annuo complessivo di prelievo pari a 24.000 m³/anno risulta di entità limitata rispetto alla scala dell'acquifero locale, caratterizzato da elevato spessore dell'unità produttiva ISS (~ 45 m saturi);
- la falda presenta soggiacenza ridotta (≈ 2.5 m da p.c.) ma con oscillazioni storiche contenute (±1 m), senza evidenza di trend regressivi pluriennali;
- la modellazione numerica nella condizione di *worst case scenario,* quindi per una durata di 90 giorni (acquifero parzialmente isolato ed emungimento simultaneo di 10.5 l/s per ciascun pozzo) evidenzia abbassamenti pari a circa 0.08 e 0.32 m a 100 m dal centro pozzo, rispettivamente per scenari di $K_{max} = 5\times10^{-4}$ m/s e $K_{min} = 1\times10^{-4}$ m/s
- il regime di esercizio previsto è discontinuo e stagionale, con conseguente riduzione significativa del tempo equivalente annuo di pompaggio rispetto a condizioni di esercizio continuo;
- il censimento delle captazioni esistenti non evidenzia pozzi civili con portate comparabili o con aree di influenza potenzialmente sovrapposte a quella del progetto.

Alla luce delle evidenze sopra riportate, il sistema acquifero locale risulta in grado di sostenere il prelievo previsto senza determinare condizioni di sovrasfruttamento né alterazioni piezometriche permanenti.

Sulla base della caratterizzazione idrogeologica eseguita, dei dati piezometrici disponibili e dei risultati della modellazione numerica, si conclude che il sistema acquifero locale è in grado di sostenere i prelievi previsti senza determinare condizioni di sovrasfruttamento, alterazioni permanenti del regime piezometrico o interferenze significative con i punti di emungimento esistenti.